



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**

**CAMPUS DE CRATEÚS**

**GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

**KAROLINE CARVALHO BARBOSA**

**ÍNDICE DE ESTADO TRÓFICO ADAPTADO AOS RESERVATÓRIOS DO  
SEMIÁRIDO CEARENSE**

**CRATEÚS - CE**

**2021**

KAROLINE CARVALHO BARBOSA

ÍNDICE DE ESTADO TRÓFICO ADAPTADO AOS RESERVATÓRIOS DO SEMIÁRIDO  
CEARENSE

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Área de concentração: Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof<sup>ª</sup>. Ma. Raimunda Moreira da Franca.

CRATEÚS - CE

2021

- 
- B198Í Barbosa, Karoline Carvalho.  
Índice de Estado Trófico Adaptado aos Reservatórios do Semiárido Cearense / Karoline Carvalho  
Barbosa. – 2021.  
63 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús,  
Curso de Engenharia Ambiental, Crateús, 2021.  
Orientação: Profa. Ma. Raimunda Moreira da Franca.
1. Índice de Estado Trófico para o Semiárido. 2. Eutrofização. 3. Análise de Componentes Principais. I.  
Titulo.

CDD 628

---

KAROLINE CARVALHO BARBOSA

ÍNDICE DE ESTADO TRÓFICO ADAPTADO AOS RESERVATÓRIOS DO SEMIÁRIDO  
CEARENSE

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Engenharia Ambiental  
e Sanitária da Universidade Federal do Ceará,  
Campus de Crateús, como requisito parcial à  
obtenção do título de Bacharel em Engenharia  
Ambiental e Sanitária.

Área de concentração: Saneamento Ambiental.

Aprovada em: \_\_\_ / \_\_\_ / \_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

\_\_\_\_\_  
Profª. Ma. Raimunda Moreira da Franca (Presidente)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

\_\_\_\_\_  
Profª. Ma. Larissa Granjeiro Lucena (Examinadora interna)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

\_\_\_\_\_  
Profª. Ma. Janine Brandão de Farias Mesquita (Examinadora interna)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

\_\_\_\_\_  
Me. Gustavo Ross Ribeiro Lima (Examinador externo)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus familiares e amigos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, que foi minha luz nos dias difíceis. Ele é a minha fonte inesgotável de força e inspiração.

Ao meu noivo Luan Barboza de Mesquita, que sempre caminhou ao meu lado, acreditou em mim em momentos em que eu desacreditei, foi o meu porto seguro e tornou essa trajetória acadêmica menos árdua, comemorando sempre minhas pequenas vitórias de cada dia. Obrigada pela paciência e pelo amor por todos esses anos.

Aos meus familiares, em especial minha avó, M<sup>a</sup> Dúlia Machado, que me assumiu o papel de pai e mãe para mim e meus irmãos. E a Ana Rosa Vieira, minha futura sogra, pelo apoio incondicional.

Ao meu irmão, João Artur que nos meus momentos de fraqueza me deu força de querer vencer para poder ajudá-lo.

À Profa. Ma. Raimunda Moreira da Franca, pela excelente orientação, pela amizade, paciência e pelos ensinamentos compartilhados.

Aos colegas de turma e amigos Jenilson, Alisson, Leyanne, Gabriela, Fabriny, Isabel, Ivo, Elaine, Guilherme, Marcela, Monalisa, Luan e Lucas, pelas reflexões, críticas e suporte ao longo dessa caminhada, vocês foram fundamentais.

À Euciclene Linhares, Luanny Moreira, Aryanne Galvão, Luma Melo, Karyne Melo, Karina Albuquerque, Vitória Régia dentre tantos outros amigos que fizeram parte dessa jornada como incentivadores, que caminharam ao meu lado e acreditaram em mim.

À Prof. Dra. Janaina Lopes Leitinho, pela amizade e orientação ao longo desses anos em projetos da universidade que me abriram portas para o conhecimento. Gratidão por todo o apoio que você me ofereceu em momentos difíceis e pelas cobranças que me fizeram mais resiliente.

Aos demais professores do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária: Janine, Thayres, Luana, Larissa, Alan, Luísa, pelas exigências, cobranças, experiências e conhecimentos trocados, vocês foram essenciais nessa jornada.

À COGERH, pela disponibilização dos dados que viabilizaram o presente estudo.

“Só um sentido de invenção e uma necessidade intensa de criar levam o homem a revoltar-se, a descobrir e a descobrir-se com lucidez”. (Pablo Picasso).

## RESUMO

Os reservatórios do semiárido nordestino são naturalmente susceptíveis aos fenômenos de eutrofização, em decorrência das particularidades ambientais. O aumento da disponibilidade de nutrientes nesses reservatórios, principalmente fósforo e nitrogênio associado às condições locais é o ambiente ideal para a ocorrência de florações excessivas de cianobactérias impactando em seu estado trófico. O Índice de Estado Trófico – IET, é uma metodologia adotada para quantificar o estado de eutrofização dos corpos d'água, permite condensar diversas informações acerca das variáveis de qualidade da água, facilitando a interpretação das condições tróficas dos açudes e na tomada de decisões para um adequado gerenciamento dos reservatórios do semiárido. O objetivo deste trabalho foi propor e avaliar um Índice de Trofia para o Semiárido – ITS, para quatro reservatórios cearenses: Gavião, Pacoti, Riachão e Pentecoste. Utilizou-se da estatística multivariada, sobretudo, a análise das componentes principais – PCA, com auxílio do *software* PAST. O índice apresentou-se consistente, coerente, preciso e com maior sensibilidade às variações ambientais presentes nos reservatórios em estudo: Gavião, Pacoti, Riachão e Pentecoste. Os reservatórios apresentaram-se com elevado estado de eutrofização, classificando-se entre eutróficos e hipereutróficos em sua maioria, com piora no estado trófico ao longo dos anos do estudo (2014 a 2017). O percentual de volume disponível nos reservatórios, apesar de ter apresentado baixa correlação com o ITS calculado, notou-se uma piora no estado trófico com a redução do volume de água. No entanto, o ITS proposto apresentou ótimas correlações com as concentrações de nitrogênio total ( $0,9165 \leq r \leq 0,9415$ ) para todos os reservatórios, exceto o Pentecoste que apresentou baixa correlação negativa ( $r = -0,49$ ). Apesar da análise do nutriente limitante ter indicado colimitação da produtividade primária pelo fósforo total e nitrogênio total, verificou-se que o fósforo se comportou como principal limitante. O índice de estado trófico proposto mostrou-se eficiente na avaliação do grau de trofia para os reservatórios cearenses.

**Palavras-chave:** Índice de Estado Trófico para o Semiárido. Eutrofização. Análise de Componentes Principais.

## ABSTRACT

Reservoirs in the Northeastern semi-arid are naturally susceptible to eutrophication phenomena, due to environmental peculiarities. The increase in the availability of nutrients in these reservoirs, mainly phosphorus and nitrogen associated with local conditions, is the ideal environment for the occurrence of excessive blooms of cyanobacteria impacting their trophic state. The Trophic State Index - EIT, is a methodology adopted to quantify the state of eutrophication of water bodies, allows condensing various information about water quality variables, facilitating the interpretation of the trophic conditions of the dams and in making decisions for adequate management of reservoirs in the semiarid region. The objective of this work was to propose and evaluate a Trophy Index for the Semi-Arid - ITS, for four Ceará reservoirs: Gavião, Pacoti, Riachão and Pentecoste. Multivariate statistics were used, mainly, the analysis of the main components - PCA, with the aid of the PAST software. The index was consistent, coherent, precise and more sensitive to environmental variations present in the reservoirs under study: Gavião, Pacoti, Riachão and Pentecoste. The reservoirs showed a high state of eutrophication, being classified between eutrophic and hypereutrophic in the majority, with worsening in the trophic state over the years of the study (2014 to 2017). The percentage of volume available in the reservoirs, despite having a low correlation with the calculated ITS, there was a worsening in the trophic state with the reduction in the volume of water. However, the proposed ITS showed excellent correlations with the concentrations of total nitrogen ( $0.9165 \leq r \leq 0.9415$ ) for all reservoirs, except Pentecost, which had a low negative correlation ( $r = -0.49$ ). Although the analysis of the limiting nutrient indicated the collimation of primary productivity by total phosphorus and total nitrogen, it was found that phosphorus behaved as the main limiting factor. The proposed trophic status index proved to be efficient in assessing the degree of trophy for the Ceará reservoirs.

**Keywords:** Trophic State Index for the semiarid. Eutrophication. Principal Component Analysis.

## LISTA DE FIGURAS

|          |   |    |
|----------|---|----|
| Figura 1 | – Mapa da localização dos reservatórios em estudo, Gavião, Riachão, Pentecoste e Pacoti.....  | 30 |
| Figura 2 | – Fluxograma da metodologia para obtenção do ITS e classificação trófica .....  | 37 |
| Figura 3 | – Volume de água, medido no final de junho de cada ano, para o reservatório Gavião, Riachão, Pacoti e Pentecoste .....  | 38 |
| Figura 4 | – Precipitações anuais para os reservatórios em estudo.....   | 39 |
| Figura 5 | – Boxplot da concentração dos parâmetros (a) clorofila a, (b) cianobactérias, (c) nitrogênio total, (d) fósforo total e (e) oxigênio dissolvido, para os reservatórios Riachão, Pacoti, Gavião e Pentecoste ..... | 41 |
| Figura 6 | – Percentual de variância das componentes principais obtida pela PCA para cada reservatório em estudo .....   | 43 |
| Figura 7 | – Representação do ITS dos reservatórios Gavião, Pacoti, Riachão e Pentecoste, obtidos em seus respectivos períodos .....   | 46 |
| Figura 8 | – Biplot CP1 x CP2 sobre as variáveis nos reservatórios pela PCA .....  | 50 |
| Figura 9 | – Correlação entre as variáveis dos reservatórios em estudo, (a) Gavião, (b) Riachão, (c) Pacoti e (d) Pentecoste .....   | 51 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Modelos matemáticos para o cálculo do IET .....   | 22 |
| Tabela 2 – Valores limites para os modelos de IET e classificação .....  | 23 |
| Tabela 3 – Características dos reservatórios em estudo.....  | 29 |
| Tabela 4 – Aspectos gerais dos municípios em estudo .....  | 31 |
| Tabela 5 – Variáveis e metodologias utilizadas nos procedimentos analíticos.....   | 34 |
| Tabela 6 – Classificação dos reservatórios de acordo com o ITS .....   | 36 |
| Tabela 7 – Estatística descritiva para as variáveis dos reservatórios Riachão, Gavião, Pacoti e Pentecoste .....   | 40 |
| Tabela 8 – Síntese das variáveis obtidas para os quatro reservatórios em estudo.....   | 44 |
| Tabela 9 – Resultados do ITS e suas respectivas classificações trófica para os reservatórios em estudo, obtidos através dos pesos ponderados pela PCA..... | 45 |
| Tabela 10 – ITS, classificação trófica e fração de volume disponível para os reservatórios em seus respectivos períodos.....                               | 48 |
| Tabela 11 – Valores obtidos na relação N:P para os reservatórios em estudo, para o primeiro e segundo semestre do ano.....                                 | 53 |
| Tabela 12 – Valores das correlações obtidas entre o ITS e as variáveis dos reservatórios em estudo.....  | 54 |

## LISTA DE QUADROS

|   |    |
|---|----|
| Quadro 1 - Classificação e caracterização dos estados tróficos.....                         | 20 |
| Quadro 2 - Vantagens de desvantagens da utilização dos índices de qualidade de<br>água..... | 21 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                    |   |
|--------------------|---|
| ANOVA              | Análise variância                                     |
| Cél.               | Células   |
| ° C                | Graus Celsius   |
| Cl <sub>a</sub>    | Clorofila <i>a</i>                                    |
| CB                 | Cianobactéria   |
| CP                 | Componente Principal                                  |
| CONAMA             | Conselho Nacional do Meio Ambiente                    |
| ETA                | Estação de Tratamento de Água                         |
| ETE                | Estação de Tratamento de Esgoto                       |
| FUNCEME            | Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos |
| IET                | Índice de Estado Trófico                              |
| IET <sub>MSA</sub> | Índice de Estado Trófico Modificado para o Semiárido  |
| ITS                | Índice de Trofia para o Semiárido                     |
| IBGE               | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística       |
| IQA                | Índice de Qualidade da Água                           |
| N <sub>T</sub>     | Nitrogênio Total                                      |
| N:P                | Relação nutriente limitante                           |
| OD                 | Oxigênio dissolvido                                   |
| Past               | <i>Paleontological Statistics Software</i>            |
| PNRH               | Política Nacional de Recursos Hídricos                |
| PCA                | Análise de Componentes Principais                     |
| P <sub>T</sub>     | Fósforo Total   |
| r                  | Coefficiente de correlação de Pearson                 |
| T                  | Temperatura   |
| % vol.             | Percentual de volume disponível                       |

## SUMÁRIO

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO.....</b>   | <b>16</b> |
| <b>1.1</b> | <b>Justificativa.....</b>                                      | <b>17</b> |
| <b>1.2</b> | <b>Objetivos.....</b>  | <b>18</b> |
| 1.2.1      | Objetivo Geral.....  | 18        |
| 1.2.2      | Objetivos Específicos.....                                     | 18        |
| <b>2</b>   | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>                              | <b>19</b> |
| <b>2.1</b> | <b>Eutrofização em reservatórios.....</b>                      | <b>19</b> |
| <b>2.2</b> | <b>Índice de Estado Trófico.....</b>                           | <b>20</b> |
| <b>2.3</b> | <b>Índice de Trofia Modificado para o Semiárido (ITS).....</b> | <b>23</b> |
| <b>2.4</b> | <b>Variáveis Limnológicas.....</b>                             | <b>24</b> |
| 2.4.1      | Fósforo.....   | 24        |
| 2.4.2      | Nitrogênio.....  | 24        |
| 2.4.3      | Nutriente limitante (relação N:P).....                         | 25        |
| 2.4.4      | Clorofila <i>a</i> .....                                       | 26        |
| 2.4.5      | Cianobactérias.....  | 26        |
| 2.4.6      | Temperatura .....  | 27        |
| 2.4.7      | Oxigênio dissolvido .....                                      | 27        |
| 2.4.8      | Turbidez .....   | 28        |
| <b>3</b>   | <b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>                                 | <b>29</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Caracterização da pesquisa.....</b>                         | <b>29</b> |
| <b>3.2</b> | <b>Caracterização da área de estudo.....</b>                   | <b>29</b> |
| 3.2.1      | Clima e geologia.....  | 31        |
| 3.2.2      | Uso e ocupação da bacia .....                                  | 31        |
| <b>3.3</b> | <b>Procedimentos Metodológicos .....</b>                       | <b>33</b> |
| 3.3.1      | Período de estudo .....  | 33        |
| 3.3.2      | Parâmetros analisados .....                                    | 33        |
| <b>3.4</b> | <b>Índice de Trofia para o Semiárido - ITS.....</b>            | <b>35</b> |
| 3.4.1      | Análise estatística descritiva .....                           | 35        |
| 3.4.2      | Proposição do índice .....                                     | 35        |
| <b>3.5</b> | <b>Percentuais de volumes disponíveis.....</b>                 | <b>37</b> |
| <b>3.6</b> | <b>Testes estatísticos .....</b>                               | <b>38</b> |

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| <b>4</b>   | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>  | <b>39</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Armazenamento hídrico dos reservatórios .....</b>   | <b>38</b> |
| <b>4.2</b> | <b>Análise estatística descritiva das variáveis consideradas no estudo .....</b>             | <b>40</b> |
| <b>4.3</b> | <b>Proposição do índice ITS pela Análise das Componentes Principais -<br/>PCA.....</b>       | <b>43</b> |
| 4.3.1      | Obtenção do peso das componentes .....   | 46        |
| 4.3.2      | Classificação trófica dos reservatórios .....  | 45        |
| 4.3.3      | Relação entre o ITS obtido e os percentuais de volumes disponíveis nos<br>reservatórios..... | 49        |
| <b>4.5</b> | <b>Estudo do comportamento das variáveis .....</b>   | <b>51</b> |
| <b>4.6</b> | <b>Análise do Nutriente Limitante .....</b>  | <b>54</b> |
| <b>4.7</b> | <b>Análise de correlações do ITS entre os parâmetros analisados .....</b>                    | <b>55</b> |
| <b>5</b>   | <b>CONCLUSÃO.....</b>  | <b>57</b> |
| <b>6</b>   | <b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>  | <b>58</b> |
|            | <b>REFERÊNCIAS .....</b>   | <b>59</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Os desafios enfrentados no semiárido nordestino quanto às limitações do acesso ao abastecimento condicionaram políticas públicas de desenvolvimento local. A “Grande Seca” que se deu entre os anos de 1877 e 1879 ceifou milhares de vidas, obrigando pessoas a procurarem água nos centros urbanos (FRANÇA, 2013). Com isso, houve a necessidade de ampliar a infraestrutura hídrica no Nordeste. Na década de 90, essa ampliação ainda era incipiente e mostrava-se equivocada pela implantação de pequenos reservatórios vulneráveis a seca, entre outras medidas ineficientes (CIRILO, 2008).

Com a implantação da Política Nacional de Recursos Hídricos - PNRH, lei de nº 9.433/1997, o acesso a água passa a ser mais democrático, utilizando instrumentos integrados de gestão e efetivando o acesso da população (BRASIL, 1997). No entanto, devido às condições climáticas locais, regimes pluviométricos irregulares, elevados índices de radiação solar e evaporação, podem ocasionar impactos negativos na disponibilidade hídrica, que por sua vez, se relaciona com quantidade e qualidade disponível para consumo. A deterioração da qualidade da água desses reservatórios é agravada por diversos usos na bacia, ocasionando problemas no abastecimento que impactam diretamente na qualidade de vida da população (MOURA, 2016).

Os reservatórios do semiárido nordestino são naturalmente susceptíveis aos fenômenos de eutrofização devido às pequenas profundidades, o que favorece maior penetração de energia luminosa, elevadas temperaturas, maior índice de evaporação e altas cargas poluidoras, aliada aos processos erosivos que ocasionam assoreamento e carreamento de nutrientes aos corpos d'água (COGERH, 2010). Esse aporte de nutrientes nesses ambientes lênticos estimula a produtividade primária do corpo d'água, ocasionando aumento da biomassa fitoplanctônica (VON SPERLING, 2014).

A presença de cianotoxinas na água de abastecimento está associada às florações de cianobactérias, considerado um grave dano ambiental, podendo gerar impactos à saúde pública (COSTA, 2003). No nordeste brasileiro há inúmeros casos de surtos associados à intoxicação por cianotoxinas. O caso mais extremo notificado foi a Síndrome de Caruaru, ocorrida no estado de Pernambuco, que resultou na morte de mais 60 pessoas (JOCHIMSEN *et al.*, 1998).

Nessa perspectiva, a classificação dos reservatórios tendo como base o Índice de Estado Trófico (IET) surge como uma importante ferramenta de gestão dos recursos hídricos. O IET classifica os corpos d'água de acordo com o grau de eutrofização em diferentes níveis de trofia. O enriquecimento por nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo, são fatores de estímulo para a ocorrência desse fenômeno (VON SPERLING, 2014).

Portanto, conhecer a dinâmica trófica em reservatórios do semiárido destinados ao abastecimento público, bem como classificá-los de acordo com seu estado trófico, fornecem subsídios teóricos que auxiliarão na tomada de decisões, visando implementar um monitoramento e controle eficiente desses organismos tóxicos que ameaçam a saúde pública (FUNCEME, 2002).

## 1.1 Justificativa

No Nordeste brasileiro, o Ceará é o estado que mais conta com reservatórios artificiais de pequeno porte, são 4.922 reservatórios (< 5 ha) (FUNCEME, 2008). Associados aos seus elevados tempos de retenção hidráulica, em função dos baixos índices pluviométricos, esses ecossistemas se tornam altamente vulneráveis a eutrofização (BRASIL, 2016).

Os reservatórios cearenses são a principal fonte de abastecimento da população, garantem a segurança hídrica e favorecem o desenvolvimento local. Portanto, merecem estudos aprofundados, em função de suas próprias características e condicionantes ambientais, visando a promoção de uma melhor gestão dos recursos hídricos (FUNCEME, 2002).

Os índices de qualidade da água são ferramentas essenciais no acesso à informação e no gerenciamento adequado dos recursos hídricos. De maneira geral, esses índices exprimem o comportamento de diversas variáveis físico-químicas e biológicas dos corpos d'água, exprimindo resultados objetivos através de categorias tróficas (TYAGI *et al.*, 2013).

A dinâmica trófica dos reservatórios do semiárido nordestino, devido às suas particularidades climáticas de altas taxas de evaporação, pouca variação da temperatura e intensa radiação solar, demanda estudos que analisem os parâmetros que representem adequadamente as condições tróficas locais, visto que, grande parte dos estudos de eutrofização são desenvolvidos para região de clima temperado (BOUVY *et al.*, 1999). Para tanto, a relevância desse estudo é fornecer subsídios teóricos sobre a análise de classificação do estado trófico desses ecossistemas tropicais, levando em consideração aspectos que representem adequadamente suas reais condições ambientais.

Em ambientes com disponibilidade de nutrientes e potencialmente eutrofizados, o crescimento da biomassa de organismos pode desencadear, em certas condições ambientais, a liberação de toxinas maléficas aos homens e animais. Esse fenômeno compromete o abastecimento de água e os sistemas convencionais de tratamento não as remove (VIDAL; CAPELO NETO, 2014).

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo principal propor uma metodologia para a obtenção do Índice de Trofia para o Semiárido – ITS, com uso da estatística multivariada, e avaliar o grau de trofia nos reservatórios cearenses: Riachão, Pentecoste, Pacoti e Gavião.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Estudar as variáveis mais representativas no processo de eutrofização dos reservatórios do semiárido;
- b) Avaliar os dados dos reservatórios através da análise multivariada de Componentes Principais – PCA, visando calibrar os pesos dos parâmetros de maior relevância no estudo;
- c) Propor um Índice de Estado Trófico desenvolvido para o trópico semiárido - ITS com os pesos obtidos da estatística multivariada, e classificar os reservatórios com base em seu grau de trofia.
- d) Analisar e discutir o comportamento das variáveis nos reservatórios;
- e) Avaliar as interações dos valores obtidos do ITS com os parâmetros de qualidade de água, percentuais de volumes disponíveis nos reservatórios e com o nutriente limitante no meio.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Eutrofização em reservatórios

A eutrofização é um fenômeno causado por uma mudança da biomassa de produtores primários, ocorrendo proliferação excessiva do fitoplâncton em consequência do enriquecimento do corpo d'água principalmente por nitrogênio e fósforo (HUTCHINSON, 1975). Diversos fatores limnológicos podem ser interferentes no processo de eutrofização; a luz e a temperatura exercem papéis fundamentais neste processo (TOLEDO, 1983).

A ocorrência da eutrofização pode estar atrelada a eventos naturais e/ou artificiais. Ocorre naturalmente quando associado ao carreamento de nutrientes do solo pelas águas pluviais, um processo lento, associado ao longo tempo de residência da água no reservatório (BARBOSA, 2017). No entanto, a eutrofização artificial é oriunda da contaminação por ações antrópicas que se dão pelo lançamento de efluentes, atividades industriais e monoculturas (ESTEVES, 1998).

Para Toledo (1983), a eutrofização ocasiona diversos efeitos negativos, tais como: impactos paisagísticos e na recreação; interferências na aeração e evaporação; aumento da demanda bentônica causada pela sedimentação das algas; criando zonas de anaerobiose; entre outros. A sobrecarga de sólidos devido às florações de algas nas Estações de Tratamento de Água (ETA) ocasiona o entupimento dos filtros e aumenta o potencial de formação de trihalometanos na água tratada (FUNCEME, 2002).

As consequências da eutrofização para a comunidade fitoplanctônica está atrelada com a concentração de fosfato, fazendo com que ocorram impactos negativos, provocando o aumento da densidade e a redução da riqueza da comunidade. Predominam grupos específicos característicos de reservatórios eutrofizados, tais como, *Asterionella* spp., *Estephanodiscus* spp., e espécies cianofíceas, ocorrendo florações destas, em meses mais quentes (ESTEVES, 1998).

As condições dos reservatórios do semiárido nordestino, compreendendo elevadas temperaturas e alta luminosidade em ambientes lânticos, favorecem florações excessivas de densas massas flutuantes, formadas por cianobactérias e algas, que alteram o estado trófico do corpo d'água para hipereutrofizado, devido às altas concentrações de nutrientes (BITTENCOURT-OLIVEIRA *et al.*, 2012).

A eutrofização é um fenômeno recorrente nos reservatórios cearenses. De acordo como o relatório de qualidade das águas dos açudes monitorados pela COGERH (2020),

verificou-se que dos 127 reservatórios monitorados, 92 apresentam-se eutrofizados, representando 73 % do total, variando nas classes entre eutróficos e hipereutróficos.

Para Von Sperling (1996), o controle da eutrofização pode ser subdividido em duas categorias: o controle preventivo na bacia hidrográfica através da redução de contaminantes difusos, como, por exemplo, estratégias de tratamento e disposição adequadas de efluentes domésticos e o manejo de águas pluviais. E o controle corretivo, que se dá diretamente no reservatório através de processos químicos, mecânicos e biológicos, dos quais se pode citar, respectivamente, a precipitação química do fósforo, aeração do hipolímnio e a manipulação da cadeia alimentar.

## 2.2 Índice de Estado Trófico

A eutrofização dos corpos d'água ocasiona mudanças no estado trófico. Para quantificar esse fenômeno e classificar os reservatórios em diferentes graus de trofia, utiliza-se o Índice de Estado Trófico (IET), metodologia capaz de diagnosticar a qualidade da água com base no enriquecimento e proliferação de produtores primários (CETESB 2013; LIMA, 2019).

De maneira geral, essa classificação busca enquadrar os reservatórios em quatro principais classes de estado trófico: oligotrófico, mesotrófico, eutrófico e hipereutrófico. No Quadro 1, constam as principais características presentes em cada classificação.

**Quadro 1.** Classificação e caracterização dos estados tróficos

| <b>Classificação do estado trófico</b> | <b>Características</b>   |
|--|--|
| Oligotrófico                           | Águas claras, com menor aporte de nutrientes e baixa produtividade de produtores primários.  |
| Mesotrófico                            | Produtividade intermediária, com pequeno comprometimento da qualidade da água, mas grande parte, em níveis aceitáveis.   |
| Eutrófico                              | Elevada produtividade, menor transparência, alterações indesejáveis na qualidade da água devido ao maior aporte de nutrientes e comprometimento dos usos.  |
| Hipereutrófico                         | Corpos d'água afetados significativamente pelas elevadas concentrações de matéria orgânica e nutrientes, ocorrendo depleções nas concentrações de oxigênio dissolvido, ocasionando morte de peixes e florações de algas. |

Fonte: Adaptado de ANA (2015).

Os índices mais usuais na avaliação da qualidade da água são: Índice de Qualidade da Água - IQA e o Índice de Estado Trófico – IET. São ferramentas valiosas que descrevem de forma objetiva às condições de qualidade dos mananciais (TYAGI *et al.*, 2013). O Quadro 2 aborda as principais vantagens e desvantagens da utilização desses índices.

**Quadro 2.** Vantagens de desvantagens da utilização dos índices de qualidade de água

|                         |                              |   |
|-------------------------|------------------------------|---|
| <b>Pontos Positivos</b> | Simplificação                | Exprime o comportamento de uma série de variáveis representativas de forma objetiva   |
|                         | Informativo                  | Facilita a comunicação  |
|                         | Ferramenta de gestão         | Importante ferramenta de gestão de recursos hídricos  |
|                         | Ajustável                    | Permite se adaptar à diferentes realidades ambientais através de mudanças metodológicas e na escolha de variáveis representativas                     |
| <b>Pontos Negativos</b> | Perda de informações         | Pode ocorrer perda de dados durante o tratamento dos mesmos   |
|                         | Escolha das variáveis        | A escolha de variáveis representativas é de suma importância para a precisão do índice. Há divergências entre os autores na escolha desses parâmetros |
|                         | Interação entre as variáveis | A interação entre as variáveis pode acarretar em erros associados a ponderações tendenciosas  |
|                         | Incertezas                   | Subjetividades relacionadas a complexidades ambientais  |

Fonte: adaptado de Tyagi *et al.* (2013).

As metodologias utilizadas para quantificar os índices de estado trófico foram desenvolvidas considerando as características de regiões de clima temperado. Carlson (1977) foi pioneiro nesse tipo de estudo, sua abordagem relaciona concentrações de fósforo total, clorofila *a* e transparência da água. Toledo Jr. *et al.* (1983) propuseram uma adaptação, relacionando parâmetros de fósforo total, fosfato inorgânico e clorofila *a*.

Lamparelli (2004) abordou uma metodologia de classificação do estado trófico, com base nos parâmetros: clorofila *a* e o fósforo total, desconsiderando a profundidade do disco de Secchi pelas interferências provocadas pela turbidez mineral. A Tabela 1 apresenta as formulações matemáticas propostas pelos autores citados.

**Tabela 1.** Modelos matemáticos para o cálculo do IET

| Fonte                           | Equações  |
|---------------------------------|---|
| Carlson (1977)                  | $\text{IET}_{\text{PT}} = 14,42 \cdot \ln(\text{PT}) + 4,15$ $\text{IET}_{\text{NT}} = 14,43 \cdot \ln(\text{NT}) + 54,45$ $\text{IET}_{\text{Cla}} = 9,81 \cdot \ln(\text{Cla}) + 30,60$ $\text{IET}_{\text{A}} = (\text{IET}_{\text{PT}} + \text{IET}_{\text{NT}} + \text{IET}_{\text{Cla}})/3$ |
| Toledo Jr. <i>et al.</i> (1983) | $\text{IET}_{\text{PT}} = 14,43 \cdot \ln(\text{PT}) - 3,28$ $\text{IET}_{\text{Cla}} = 10,03 \cdot \ln(\text{Cla}) + 30,57$ $\text{IET}_{\text{B}} = (\text{IET}_{\text{PT}} + \text{IET}_{\text{Cla}})/2$   |
| Lamparelli (2004)               | $\text{IET}_{\text{PT}} = 6,06 \cdot \ln(\text{PT}) + 34,46$ $\text{IET}_{\text{Cla}} = 4,91 \cdot \ln(\text{Cla}) + 46,73$ $\text{IET}_{\text{C}} = (\text{IET}_{\text{PT}} + \text{IET}_{\text{Cla}})/2$  |

**Cla** – clorofila *a*, **Pr** – fósforo total, **N<sub>T</sub>** – nitrogênio total, **IET**- índice de estado trófico.  
 Fonte: Adaptado de Lima (2019).

Von Sperling (1994) estudou a eutrofização em corpos d'água tropicais, utilizando como alicerce as concentrações de fósforo. A justificativa seria que a assimilação de fósforo em corpos d'água situados nesta região é maior do que em regiões de clima temperado.

Os intervalos de valores para a classificação do estado trófico com base na modelagem proposta pelos autores citados constam na Tabela 2.

**Tabela 2.** Valores limites para os modelos de IET e classificação

| Níveis Tróficos | Modelos        |                                 |                   |
|-----------------|----------------|---------------------------------|-------------------|
|                 | Carlson (1977) | Toledo Jr. <i>et al.</i> (1983) | Lamparelli (2004) |
| Oligotrófico    | ≤30            | 25- 44                          | 48 – 52           |
| Mesotrófico     | 31 – 40        | 45 – 54                         | 53 – 59           |
| Eutrófico       | 41 – 60        | 55 – 74                         | 60 – 63           |
| Supereutrófico  | -              | -                               | 64 – 67           |
| Hipereutrófico  | >60            | >74                             | >67               |

Fonte: Adaptado de Lima (2019).

A Cetesb (2012) na classificação do estado trófico utilizou apenas duas variáveis: clorofila *a* e fósforo total, desconsiderando as medidas de transparência da água, visto que esta pode ser afetada pela turbidez mineral. Esse estudo foi baseado no modelo proposto por Lamparelli (2004). As concentrações de fósforo total estabelecem uma medida do potencial de

eutrofização do corpo d'água, e se comportam como agente causador do processo. Já a clorofila *a* está associada à resposta ao fenômeno de eutrofização, indicando a dinâmica de crescimento dos produtores. Portanto, essa relação representa de maneira eficiente a relação causa-efeito do processo de eutrofização.

### 2.3 Índice de Estado Trófico para o Semiárido

O estado trófico envolve esferas multidimensionais levando em consideração aspectos dinâmicos de carga e transporte de nutrientes, produtividade, quantidade e qualidade da biota e morfometria do lago (DUARTE *et al.*, 1998). Nas regiões do semiárido nordestino os processos metabólicos são favorecidos pelas condições locais, proporcionando maior grau de produtividade e, portanto, as categorias tróficas tendem a ser maiores do que em climas temperados (BRASIL *et al.*, 2016).

É necessário que haja análise rigorosa das diferenças limnológicas das regiões de clima tropical, visto que o crescimento dos organismos aquáticos se dá conforme as dinâmicas hidrológicas e ambientais locais, e essas metodologias foram desenvolvidas com base em dados de reservatórios de clima temperado (LAMPARELLI, 2004).

Ainda de acordo com Lamparelli (2004) a metodologia de classificação do estado trófico proposta por Carlson (1977) apresentava limitações para regiões tropicais, visto que foi desenvolvido com base nos parâmetros clorofila *a* e fósforo total, não considerando variáveis que representem de maneira mais precisa a presença do fitoplâncton, um parâmetro muito relevante nos estudos dos reservatórios cearenses.

Lima (2019) propôs um Índice de Estado Trófico modificado para o trópico Semiárido (IET<sub>MSA</sub>), sua pesquisa subsidiou esse estudo. O autor supracitado cita a falta de representatividade das variáveis relevantes nos estudos de estado trófico para os reservatórios do semiárido nordestino. Com isso, o IET<sub>MSA</sub> propõe classificar os reservatórios com base no nitrogênio total, fósforo total e clorofila *a*, parâmetros frequentemente utilizados. No entanto, pelos motivos já citados, o autor não considerou a profundidade do disco de Secchi e incluiu a contagem total de cianobactérias.

Outros estudos de avaliação de condições tróficas dos reservatórios do Ceará foram desenvolvidos, propondo diferentes metodologias e adaptações (BARROS, 2013; ROLIM, 2016).

## 2.4 Variáveis Limnológicas

### 2.4.1 Fósforo

O fósforo é um nutriente essencial para o desenvolvimento das comunidades aquáticas responsáveis pela manutenção dos ecossistemas (VON SPERLING, 1996). Dos processos metabólicos essenciais, o fósforo participa no armazenamento de energia, auxilia na produção de ATP e na estruturação da membrana plasmática. Atua como principal fator limitante da produtividade e, quando em excesso, está associado ao desequilíbrio ecossistêmico, ocasionando o fenômeno da eutrofização (ESTEVES, 1998).

O fósforo está presente no meio líquido sob diversas formas, no entanto, a forma de ortofosfato é a mais importante nos estudos limnológicos por ser a forma assimilada pelos vegetais aquáticos e organismos fotossintetizantes (ESTEVES, 1998).

A presença do fósforo está ligada, principalmente, ao lançamento de efluentes sanitários e industriais, águas drenadas de áreas agrícolas pelo uso de fertilizantes e pesticidas (CETESB, 2014). Sua ocorrência natural está associada a dissolução de rochas e decomposição da matéria orgânica, uma pequena parcela quando comparada à contaminação artificial (VON SPERLING, 1996). Do fosfato que entra no ecossistema, uma parcela é precipitada no sedimento. A dinâmica ecossistêmica afeta o ciclo do fósforo no sedimento através das concentrações de oxigênio no meio, fazendo com que ocorra precipitação do fósforo em zonas aeróbias (hipolímnio aeróbio), enquanto que em zonas anaeróbias ocorre a liberação do mesmo para a coluna d'água (hipolímnio anaeróbio) (BRAGA, 2006).

A Resolução CONAMA Nº 357/2005 estabelece valores máximos permissíveis de fósforo total de 0,02 mg/L P, 0,03 mg/L P e 0,05 mg/L P para as Classes 1, 2 e 3, respectivamente, para ambientes lênticos (BRASIL, 2005).

### 2.4.2 Nitrogênio

O nitrogênio é um elemento imprescindível para a vida aquática. Está associado à produção de proteínas que compõe a biomassa, podendo limitar a produção das comunidades fitoplancônicas, em casos de pouca disponibilidade. Apresenta-se de diversas formas na coluna d'água, no entanto, a forma de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) e de amônia, destacam-se por serem as principais fontes de nitrogênio dos produtores primários (ESTEVES, 1998).

Em regiões tropicais, a disposição de nitrato na coluna d'água é influenciada diretamente pelo grau de oxigenação e pela dinâmica das bactérias nitrificantes e desnitrificantes (ESTEVES, 1998). As concentrações de nitrato são mais baixas durante a estratificação térmica, visto que ocorre a assimilação através do fitoplâncton na região aeróbia e nas camadas inferiores ocorre a amonificação do nitrato (BRAGA, 2006).

A resolução CONAMA N° 357/2005 estabelece valores máximos permitidos para águas doces classes I e II de 10,0 mg/L N de nitrato, 1,0 mg/L N de nitrito e 2 mg/L N ( $7,5 < \text{pH} \leq 8,0$ ) para nitrogênio amoniacal total (BRASIL, 2005).

#### 2.4.3 Nutriente limitante (relação N:P)

Nos estudos de eutrofização ainda há controvérsias concernente à determinação do nutriente limitante. Vários estudiosos se dedicaram a entender essa dinâmica nos corpos d'água (BRASIL *et al.*, 2016; VON SPERLING, 1996).

O conceito de nutriente limitante é explicado pela lei do mínimo proposta por Liebig, o qual estabelece que a utilização de um nutriente para o desenvolvimento de um organismo é limitada pela substância disponível nas quantidades mínimas necessárias para o seu crescimento e reprodução (ODUM, 1971 *apud* TOLEDO JR. *et al.*, 1983).

O fósforo, na maioria dos reservatórios, tem se comportado como nutriente limitante, visto que o nitrogênio está disponível na atmosfera e isso favorece sua captura para algumas espécies de algas, em condições extremas (FUNCEME, 2002). Estudos demonstram que há relação direta entre as concentrações de fósforo na coluna d'água e o aumento da produtividade dos ambientes aquáticos (BITENCOURT-OLIVEIRA *et al.*, 2012). No entanto, é importante salientar que a maior parte desses estudos foram desenvolvidos em corpos d'água de regiões de clima temperado.

Em contrapartida, estudos empíricos realizados na região tropical têm apontado evidências de que o nutriente limitante tende a ser o nitrogênio. Conforme Lewis (2000) em regiões tropicais o nitrogênio atua como nutriente limitante em comparação ao fósforo. Isso pode ser explicado pelas características e particularidades dessa região, tais como, precipitações intensas em curtos períodos favorecendo fenômenos erosivos, elevada turbidez mineral o que reduz a penetração solar, baixa relação N: P, limitando a produtividade pelo nitrogênio, tempo de detenção e morfologia dos lagos (FUNCEME, 2002).

A ocorrência de limitação por nitrogênio total nos ecossistemas aquáticos não impede o crescimento do fitoplâncton, pois há disponibilidade do mesmo na atmosfera,

podendo ocorrer, neste caso, a fixação do mesmo através de organismos fixadores (XU *et al.*, 2010).

#### 2.4.4 Clorofila *a*

A clorofila *a* está diretamente relacionada com o estado trófico dos ambientes aquáticos. É indicadora da presença de produtores primários em um corpo d'água, representando de 1 a 2% do peso seco do material orgânico em todas as algas planctônicas (BARROS, 2013).

Dos pigmentos fotossintéticos disponíveis (clorofilas *a*, *b*, *c* e *d*), apenas a clorofila *a* (Chl *a*) está presente em todos os organismos que realizam fotossíntese. Isso explica sua importância nos estudos de estado trófico dos corpos d'água. A principal função da clorofila *a* no metabolismo é a realização da fotoquímica (o primeiro estágio do processo fotossintético), os demais, atuam como auxiliares da fotossíntese (STREIT *et al.*, 2005).

Carlson (1977) ao propor o Índice de estado trófico (IET) fundamentou-se na variável clorofila *a* como parâmetro de maior importância na classificação trófica dos corpos hídricos, o que embasou diversos estudos que vieram posteriormente aperfeiçoando essa metodologia.

Os limites máximos de clorofila *a* são regulamentados pela Resolução CONAMA Nº 357/2005 em que estabelece o limite de 10 µg/L, 30 µg/L e 60 µg/L para as Classes 1, 2 e 3, respectivamente (BRASIL, 2005).

#### 2.4.5 Cianobactérias

As cianobactérias são produtores primários no ecossistema aquático. Esses organismos são procariontes e fotossintéticos. Têm sido alvo de muitos estudos pelo seu risco de contaminação associado às cianotoxinas (BORTOLLI; PINTO, 2015).

Estudos realizados em reservatórios no semiárido brasileiro têm indicado a presença de cianobactérias tóxicas. Segundo o levantamento realizado no reservatório de abastecimento público do município de Caucaia (Ceará), identificou-se 41 táxons, sendo que as cianobactérias representaram uma parcela de 46%, seguida pela Chlorophyceae (32%), uma classe de algas verdes comum nos reservatórios da região (LOPES *et al.*, 2013).

A presença de cianotoxinas nas águas de abastecimento desperta grande preocupação com a saúde pública, pois está atrelada a surtos de intoxicação em humanos e

animais e os processos convencionais de tratamento não as retiram. Além disso, florações de grupos fitoplanctônicos ocasionam colmatação de filtros, danos em tubulações e bombas (AZEVEDO, 1998).

O Ministério da Saúde estabelece parâmetros para cianotoxinas através da Portaria de Consolidação N° 5 de 2017 – anexo XX, destaca que na água destinada ao consumo humano o valor máximo permitido é de 1,0 µg/L de microcistinas e 3,0 µg/L STX de saxitoxinas. De acordo com a Resolução CONAMA N° 357/2005 os limites máximos para densidade de cianobactérias para os rios de classes 1, 2 e 3 é de 20.000 cel./mL, 50.000 cel./mL e 100.000 cel./mL, respectivamente.

#### 2.4.6 Temperatura

A temperatura da água afeta os processos metabólicos. Segundo Lewis (2000), a relação entre metabolismo e temperatura é de 2:10 (o metabolismo duplica a cada 10 graus). Portanto, os altos índices de radiação solar e de temperatura nas regiões tropicais favorecem aumento na produção primária, ocasionando depleção nas taxas de oxigênio dissolvido (FUNCEME, 2002).

Um outro fator agravante relaciona-se à solubilização do oxigênio. Para que o oxigênio se solubilize na água é necessário que haja condições adequadas de temperatura e pressão. Os reservatórios tropicais, no entanto, não oferecem essas condições, visto que são característicos de zonas onde ocorre elevadas temperaturas e baixa pressão (ESTEVES, 1998).

#### 2.4.7 Oxigênio dissolvido

O oxigênio dissolvido é um importante parâmetro em ecossistemas aquáticos, o qual permite a sobrevivência das espécies no meio e auxilia na ciclagem de nutrientes. É oriundo dos processos de fotossíntese do meio ou do contato entre a lâmina d'água e o ar (LIMA, 2019).

Como foi dito anteriormente, existe uma relação direta entre a concentração de oxigênio dissolvido no meio aquático com a temperatura. De acordo com Esteves (1998), em lagos de clima tropical, a decomposição da matéria orgânica é de quatro a nove vezes mais rápida quando comparado aos lagos temperados e, portanto, as concentrações do consumo de oxigênio são proporcionais.

Esse fenômeno é ainda mais agravado quando se trata de reservatórios. A biomassa de fundo, ao se decompor, consome elevadas concentrações de oxigênio dissolvido e libera gás metano e sulfídrico, desencadeando condições críticas aos reservatórios, principalmente no período de estiagem. Esse fenômeno comumente está associado a surtos de mortandade de peixes (ESTEVEES, 1998).

#### 2.4.8 Turbidez

De acordo com a ANA, a turbidez está relacionada ao grau de atenuação que um feixe de luz sofre ao atravessar a água. Esse fenômeno ocorre pela presença de sólidos em suspensão que causam absorção e espalhamento da luz. Dentre os fatores que desencadeiam o aumento da turbidez pode-se citar os sedimentos suspensos (silte, areia, argila, etc.) como também a presença de algas e plânctons.

Em reservatórios, o aumento da turbidez pode acarretar na formação de bancos de lodo pela sedimentação das partículas, favorecendo a digestão anaeróbia, além de reduzir a penetração de luz impactando o desenvolvimento do ecossistema (ESTEVEES, 1998). Nas estações de tratamento de água, a turbidez é um importante parâmetro, pois reduz a eficiência das etapas de desinfecção (PIVELLI, 2011). Além disso, partículas em suspensão podem adsorver substâncias tóxicas, como agrotóxicos organoclorados e outros compostos orgânicos, portanto, a remoção da turbidez ocasiona a redução da concentração destes compostos tóxicos no meio (LIBÂNIO, 2010).

A resolução CONAMA N° 357/2005, estabelece que águas doces classe 1 devem apresentar o limite de turbidez de até 40 NTU, enquanto que para as classes 2 e 3 admite-se até 100 NTU (BRASIL, 2005).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Caracterização da pesquisa

Trata-se de um estudo analítico descritivo explicativo, sem interferência, utilizando dados secundários disponibilizados pela Companhia de Gestão de Recursos Hídricos (COGERH). De acordo com Oliveira (2011) o estudo pode ser classificado:

- a) Quanto à natureza: pesquisa observacional, em que o autor não interfere no objeto de estudo;
- b) Quanto aos objetivos: estudo exploratório e explicativo quanto aos aspectos e particularidades concernentes à pesquisa;
- c) Quanto à abordagem: pesquisa quantitativa, pois a análise se dá através de dados numéricos buscando descrever os fenômenos traçando correlações e análises estatísticas.

#### 3.2 Caracterização da área de estudo

Neste estudo analisou-se quatro reservatórios localizados no estado do Ceará: Pacoti, Riachão, Pereira do Miranda (conhecido como Pentecoste) e Gavião. Na Tabela 3 consta uma síntese das principais características dos reservatórios.

**Tabela 3.** Características dos reservatórios em estudo

| <b>Reservatório</b>                           | <b>Gavião</b> | <b>Pacoti</b> | <b>Riachão</b> | <b>Pereira do Miranda</b> |
|---|---------------|---------------|----------------|---------------------------|
| Município                                     | Pacatuba      | Horizonte     | Itaitinga      | Pentecoste                |
| Bacia Hidrográfica                            | Metropolitana | Metropolitana | Metropolitana  | Curu                      |
| Ano de Construção                             | 1973          | 1981          | 1981           | 1957                      |
| Capacidade (m <sup>3</sup> )                  | 32.900.000    | 380.000.000   | 46.950.000     | 395.638.000               |
| Rio/Riacho Barrado                            | Cocó          | Pacoti        | Pacoti         | Canindé                   |
| Área da Bacia Hidrográfica (km <sup>2</sup> ) | 97,12         | 1.080,00      | 33,68          | 2.840,00                  |

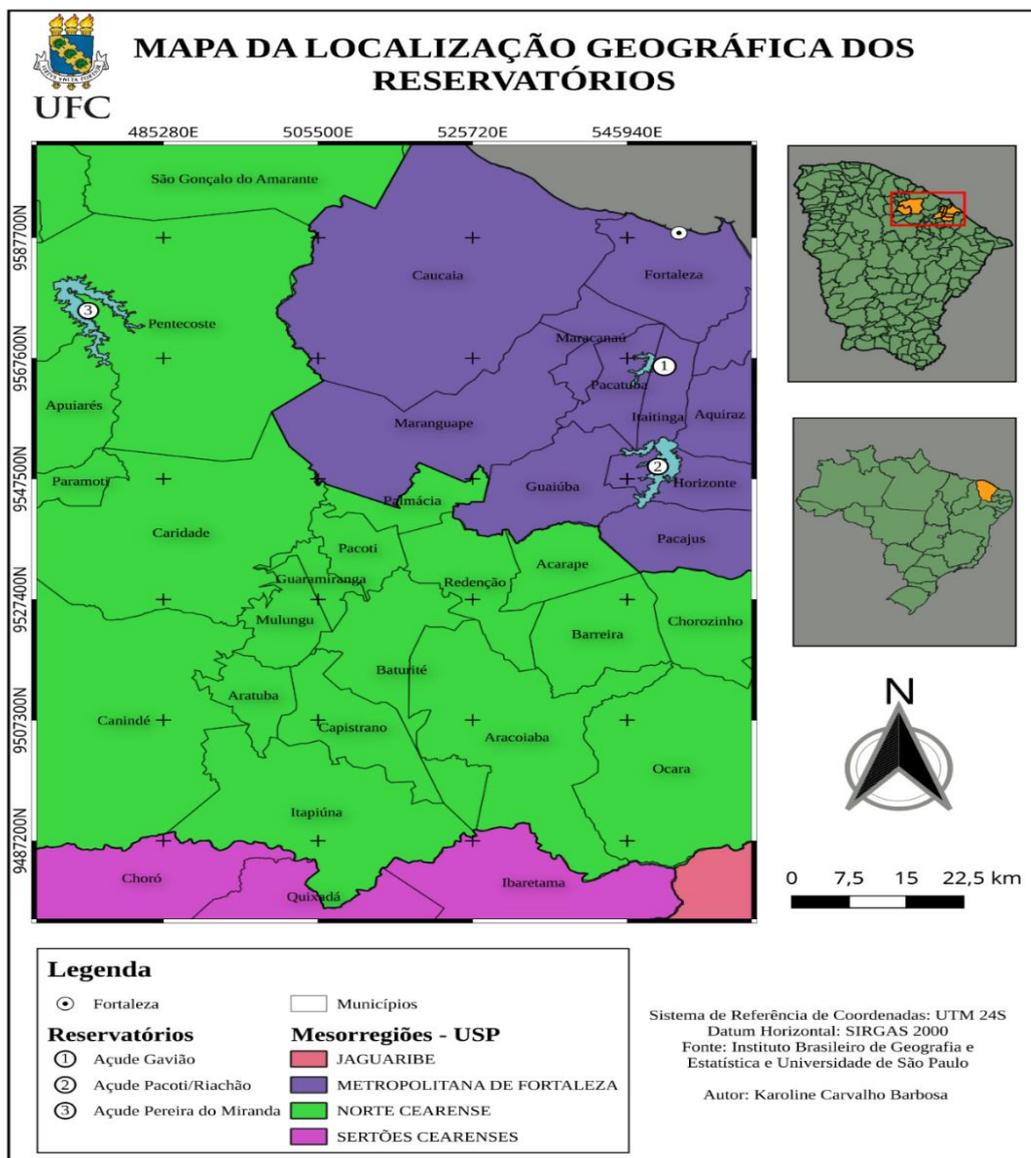
Fonte: Adaptado COGERH (2011).

A localização geográfica e as delimitações das mesorregiões das bacias hidrográficas são abordadas na Figura 1. A escolha dos reservatórios para estudo ocorreu em

função da importância para a segurança hídrica. Os açudes analisados neste estudo compõem a bacia metropolitana, fazendo parte do Sistema Integrado de Abastecimento da Região metropolitana de Fortaleza, atendendo aproximadamente 55% da população urbana do estado do Ceará, com exceção apenas do reservatório Pentecoste, que faz parte da bacia do Curu (ANA, 2010).

É importante destacar que os reservatórios foram estrategicamente selecionados em bacias hidrográficas com diferentes características ambientais, visando obter uma análise precisa de possíveis comportamento distintos na classificação trófica em decorrência dessas mudanças espaciais/ambientais.

**Figura 1.** Mapa da localização dos reservatórios em estudo: Gavião, Riachão, Pentecoste e Pacoti



Fonte: Elaborado pela autora.

### 3.2.1 Clima e geologia

A caracterização climática dos reservatórios Gavião, Pacoti e Riachão que compõem a bacia Metropolitana de acordo com a classificação do IBGE (2002), varia entre um clima super-úmido, semi-úmido e quente. O caso mais crítico é o reservatório Pentecoste, que contribui para a bacia do Curu, onde predomina o clima tropical quente semiárido (COGERH, 2018). Ocorre a predominância de dois períodos definidos: seco com longa duração e um úmido com curta duração, nos quais as temperaturas médias anuais variam entre 26°C a 28°C (IPECE, 2010).

A classificação climática proposta por Köppen-Geiger considera que os reservatórios se encontram predominantemente na zona climática “As”: clima tropical com estação seca de verão (COGERH, 2018).

Predomina na região da bacia metropolitana que abrange a maior parte dos reservatórios em estudo, o domínio litológico Gnáissico-Migmatítico que caracteriza rochas de embasamento cristalino, com a presença de ambientes fluviais e lacustres com depósitos aluvionares (COGERH, 2011).

### 3.2.2 Uso e ocupação da bacia

Os aspectos relacionados ao uso e ocupação da bacia são de grande relevância para os estudos de eutrofização dos corpos d’água por impactar diretamente as condições tróficas locais. A Tabela 4 apresenta os principais aspectos relacionados aos municípios onde estão inseridos os reservatórios em estudo. Alguns municípios não disponibilizam dados referentes ao percentual de esgotamento sanitário, é o caso do município de Pentecoste.

**Tabela 4.** Aspectos gerais dos municípios em estudo

| <b>Município</b>                    | <b>Pacatuba</b>      | <b>Horizonte</b>         | <b>Itaitinga</b>                 | <b>Pentecoste</b>    |
|-------------------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------------------|----------------------|
| Reservatório de abastecimento       | Gavião               | Pacoti                   | Riachão                          | Pereira do Miranda   |
| População (hab.)                    | 72.299               | 55.187                   | 32.678                           | 35.400               |
| Economia                            | Industria e serviços | Agricultura e industrias | Agricultura e extração de rochas | Industria e serviços |
| Ligações domiciliares ativas - água | 9.631                | 4.680                    | 9.912                            | 8.322                |
| Abastecimento de água               | 98,49%               | 95,96 %                  | 95,47 %                          | 99,75%               |
| Tratamento da água                  | ETA –                | ETA                      | ETA – filtração                  | ETA                  |

|  |                  |                  |                              |         |
|--|------------------|------------------|------------------------------|---------|
|  | cloração         |                  | e cloração                   |         |
| Esgotamento sanitário                                  | 78,30 %          | 13,78 %          | 6,0 %                        | 27,10 % |
| Destinação dos resíduos sólidos urbanos                | Aterro sanitário | Aterro sanitário | Aterro sanitário de Pacatuba | Lixão   |
| Sistemas coletivos de tratamento de esgotos sanitários | Presente         | ---              | Presente                     | ---     |

Fonte: COGERH (2011); IPECE (2015); IBGE (2010).

Do levantamento realizado, o município de Itaitinga destacou-se por sua atividade econômica que se dá, principalmente, pela exploração mineral. De acordo com a COGERH (2011), não há um manejo adequado dos rejeitos, tampouco, contenção desses poluentes oriundos das atividades desenvolvidas na mina, o que ocorre é o depósito de sedimentos na bacia hidrográfica do açude Riachão, ocasionando grande impacto na qualidade das águas, provocando aumento do assoreamento e da turbidez mineral. Nos demais municípios, há a predominância de atividades agrícolas e com menor destaque, serviços e indústrias.

A inexistência de sistemas coletivos de coleta/tratamento de esgotos, observado nos municípios Horizonte e Pentecoste, fazendo-se necessário a utilização de soluções individualizadas, em sua grande maioria fossa/sumidouro, que em muitos casos, não atendem aos critérios de projeto, podendo contaminar os lençóis freáticos. Além disso, uma prática comum nos municípios de pequeno porte é a existência de lançamento in natura dos dejetos através dos sistemas de drenagem urbana nos afluentes desses reservatórios precarizando os sistemas (COGERH, 2011).

No distrito de São Pedro, localizado no município de Pentecoste, nas proximidades do reservatório Pentecoste existe a instalação de uma indústria de calçados, muito importante para a economia local. O município de Horizonte, apesar de dispor seus resíduos sólidos urbanos em um aterro sanitário, não solucionou a problemática do lixão que era utilizado. Esse lixão desperta preocupação por parte das companhias de saneamento, por sua proximidade com o reservatório Pacoti, que faz parte do complexo hídrico que abastece toda a região metropolitana de Fortaleza (COGERH, 2011).

Um outro aspecto ambiental relevante refere-se aos cemitérios da região em estudo, pelo levantamento realizado não apresentam sistemas de coleta e tratamento do necrochorume gerado, uma realidade presente em praticamente todo o estado do Ceará. No entanto, o solo cristalino, que predomina no território cearense, pode ser uma importante barreira de contenção, evitando a dispersão desses poluentes (COGERH, 2011).

### 3.3 Procedimentos Metodológicos

#### 3.3.1 Período de estudo

O período escolhido para a análise dos dados ocorreu entre os anos de 2014 a 2017, em campanhas mensais de janeiro a dezembro em todos os reservatórios. Os dados foram subdivididos em dois períodos, de janeiro a julho (primeiro semestre) e de agosto a dezembro (segundo semestre). Essa subdivisão não representa precisamente os períodos chuvosos e secos no estado do Ceará, visto que o período chuvoso possui duração média de aproximadamente 3 a 4 meses do primeiro semestre.

As amostras foram coletadas na zona lacustre, a 0,3 metros de profundidade, nas proximidades do barramento. Adotou-se esse critério visando padronizar as condicionantes ambientais, representando de maneira mais precisa as condições dos reservatórios.

#### 3.3.2 Parâmetros analisados

Duarte *et al.* (1999) citam que a dificuldade para a construção do índice está na definição das variáveis mais representativas para comporem o IET, sendo mais frequentes a escolha da clorofila *a* e fósforo total.

Este trabalho se fundamenta nas premissas estabelecidas no estudo de Lima (2019), em que propôs uma metodologia de classificação trófica adaptada às condições semiáridas - IET<sub>MSA</sub>. Em seu estudo, o supracitado autor, adotou em sua análise variáveis usualmente empregadas: clorofila *a*, fósforo total e nitrogênio total. Adicionou-se uma variável representativa para as condições semiáridas: contagem total de cianobactérias. No entanto, não se utilizou a profundidade do disco de Secchi.

O fosfato inorgânico dissolvido ou ortofosfato, é um importante parâmetro nos estudos limnológicos, visto que, essa fração é assimilada pela comunidade aquática. Comumente, em altas temperaturas, as concentrações de ortofosfato encontram-se abaixo dos níveis de detecção devido à rápida assimilação, desencadeando ambientes eutrofizados (ESTEVEZ, 1998). Porém, neste estudo optou-se por substituir a variável fósforo total adotada no estudo de Lima (2019) por ortofosfato solúvel, representando de maneira mais efetivas as condições desses ambientes lênticos.

Outras variáveis foram incluídas e analisadas neste estudo: temperatura (T), a concentrações de oxigênio dissolvido (OD) e a turbidez, devido a dinamicidade desses

parâmetros e a importância para os ecossistemas tropicais. Elevadas temperaturas favorecem reações de decomposição de matéria orgânica no hipolímnio dos lagos fazendo com que ocorra maior consumo de OD, criando zonas de anaerobiose (ESTEVES, 1998).

Na Tabela 5 constam as variáveis selecionadas para o estudo, e as metodologias utilizadas para a obtenção dos resultados das amostras coletadas pela COGERH. As análises foram realizadas com base no *Standard Methods*.

**Tabela 5.** Variáveis e metodologias utilizadas nos procedimentos analíticos das análises de qualidade de água efetuadas pela COGERH

| Variáveis                | Unidade                               | Metodologia   |
|--------------------------|---------------------------------------|---|
| Fósforo Total            | mg P/L                                | Método do Persulfato (4500-P-J); (4500-P-E)                             |
| Ortofosfato solúvel      | mg P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> /L | Ácido ascórbico (4500-P E)  |
| Nitrogênio Total         | mg N/L                                | Método do Persulfato (4500-P-J); (4500-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -E) |
| Oxigênio Dissolvido (OD) | mg.L <sup>-1</sup>                    | Potenciometria  |
| Turbidez                 | UNT                                   | Nefelométrico (2130B)   |
| Temperatura              | °C                                    | Potenciometria  |
| Clorofila <i>a</i>       | µg/L                                  | Espectrofotométrico (10200 H)   |
| Cianobactéria            | cel./mL <sup>-1</sup>                 | Utermöhl  |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

### 3.4 Índice de Trofia Adaptado para o Trópico Semiárido - ITS

#### 3.4.1 Análise estatística descritiva

Inicialmente aplicou-se a estatística descritiva das variáveis considerando medidas de posição (média aritmética), e medidas de dispersão (variância e desvio padrão), para uma análise prévia do comportamento das variáveis através da utilização de gráficos boxplot.

De acordo com Gotelli e Ellison (2011), a estatística descritiva descreve os valores esperados e a variabilidade de uma amostra de dados. Com isso, viabilizou uma análise prévia mais aprofundada do comportamento dos parâmetros de estudo.

### 3.4.2 Proposição do índice

Para a obtenção do peso das variáveis analisadas neste estudo, utilizou-se o *Software Excel* no tratamento preliminar do conjunto de dados, visando subsidiar a posterior análise do PCA. Após selecionar as variáveis e realizar a identificação de *outliers*, que são valores atípicos que agregam erros à análise, seguiu-se os procedimentos referentes à padronização das variáveis (equação 1). Segundo Silva *et al.* (2015), essa padronização tem por objetivo obter o escore padrão ou z-escore. Para verificar a normalidade dos dados, realizou-se o teste Shapiro-Wilk indicando distribuição normal ( $p > 0,05$ ), para todas as variáveis em estudo após a padronização.

Com o auxílio do software PAleontological STatistics (PAST), versão 4.03, realizou-se a segunda etapa da pesquisa: a análise estatística multivariada, pelo método de Análise de Componentes Principais – PCA, que permitiu identificar o peso (*loadings*) dos parâmetros de maior relevância no estudo, e avaliar o comportamento dos mesmos. Provete *et al.* (2011) destacam que as Componentes Principais - CP's, são fruto da combinação linear entre as variáveis, sendo representadas em eixos ortogonais de maneira independente de forma que expliquem o comportamento do objeto de estudo.

A PCA permite simplificar uma complexa análise de um conjunto de dados direcionado às variáveis mais representativas, através de combinações lineares, que resultam em componentes principais. Segundo Gotelli e Ellison (2011), a PCA reduz a dimensionalidade dos dados, permitindo que um conjunto de variáveis-chave representem o maior percentual de variância na análise.

Uma das desvantagens da utilização da PCA está relacionado aos erros associados em banco de dados que não sejam adequadamente tratados. A PCA pode desencadear uma análise tendenciosa pela presença de *outliers* ou quando se tem mais variáveis do que unidades amostrais (PROVETE *et al.*, 2011).

Hongyu *et al.* (2015) citam que, de maneira geral, a PCA escolhida é aquela que represente a maior variabilidade dos dados, portanto, a que possua maior percentual de variação. Gotelli e Ellison (2011) afirmam que apesar não existir um critério certo de escolha para PCA, o mais adequado é utilizar a PC com maior percentual de variância.

Um outro critério utilizado na escolha da componente principal (CP) é conhecido como o critério de Kaiser (Kaiser, 1958), em que os autovalores possuem valores maiores que a unidade ( $AV > 1$ ) (HONGYU *et al.* 2015).

Os dados não devem ser inseridos brutos no PAST, visto que se encontram em

diferentes escalas, sendo necessária uma transformação objetivando equilibrar o peso das variáveis selecionadas. Para isso, aplicou-se a Equação 1.

$$C_i = \frac{\text{score bruto} - \text{média}}{\text{desvio padrão}} \quad (1)$$

Após a obtenção dos pesos das variáveis ( $P_i$ ) foi aplicada a Equação 2 e, em seguida, realizou-se a classificação trófica (Tabela 6).

$$ITS = \sum_{i=1}^n P_i C_i \quad (2)$$

$P_i$  = peso das variáveis, obtidas através das componentes principais – CP's;

$C_i$  = valor correspondente de cada variável padronizada.

Após realizado o cálculo do ITS (Equação 2), determinou-se a classificação trófica, com base na Tabela 6.

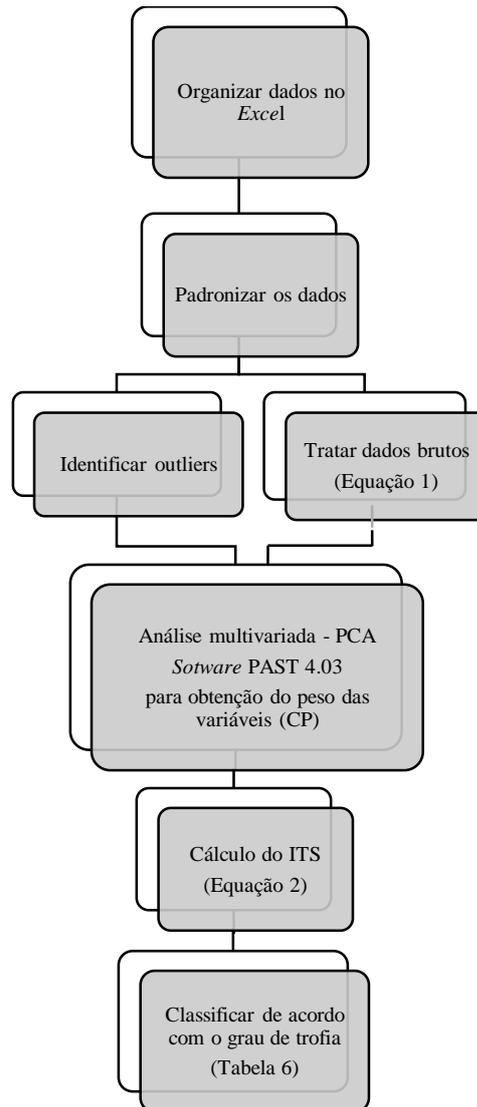
**Tabela 6.** Classificação dos reservatórios de acordo com o ITS

| ITS        | Classificação Trófica |
|------------|-----------------------|
| $\leq 1,5$ | <i>Oligotrófico</i>   |
| 1,51 – 2,5 | <i>Mesotrófico</i>    |
| 2,51 – 3,5 | <i>Eutrófico</i>      |
| $>3,5$     | <i>Hipereutrófico</i> |

Fonte: Adaptado de Lima (2019).

Para ilustrar as etapas adotadas para a obtenção do ITS a partir da análise de Componentes Principais - PCA, utilizou-se o fluxograma da Figura 2.

**Figura 2.** Fluxograma da metodologia para obtenção do ITS e classificação trófica



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

### 3.5 Percentuais de volumes disponíveis

Com base no banco de dados disponibilizado pela FUNCEME realizou-se um estudo dos percentuais de volumes disponíveis nos reservatórios e os dados de precipitação visando obter um diagnóstico inicial das condições dos reservatórios em estudo e, posteriormente, observar as mudanças no estado trófico dos reservatórios em função dos volumes disponíveis e analisar as correlações entre o índice proposto. Rocha Júnior *et al.* (2018) verificaram que as precipitações pluviométricas afetam diretamente a qualidade da água e os índices de estado

trófico dos reservatórios do semiárido brasileiro, e esses efeitos são maximizados pela redução de volume disponível de água, um fenômeno comum na região.

### 3.6 Testes estatísticos

Análise de Variância (ANOVA), é uma ferramenta estatística que permite analisar um conjunto de dados apontando possíveis diferenças significativas entre os grupos estudados (PAESE, *et al.*, 2001). Com isso, realizou-se o teste ANOVA para observar possíveis diferenças significativas ( $\rho < 0,05$ ) na classificação trófica entre os reservatórios obtidos com o ITS proposto. Em seguida, para identificar quais reservatórios apresentaram essas diferenças na classificação trófica evidenciadas no teste ANOVA, realizou-se o teste Tukey. O teste ANOVA também foi realizado para avaliar a existência de diferenças significativas entre os períodos sazonais na classificação trófica.

Para o estudo do comportamento das variáveis, com auxílio do gráfico *scatter plot*, utilizando o recurso *biplot* do PAST obteve-se a relação entre os valores dos *scores* e *loadings*, obtidos através das PC1 e PC2 para as variáveis dos reservatórios em estudo. Para aprofundar o estudo do comportamento das variáveis de qualidade de água adotadas no cálculo de ITS realizou-se a correlação de Spearman ( $1 \leq \rho \leq -1$ ).

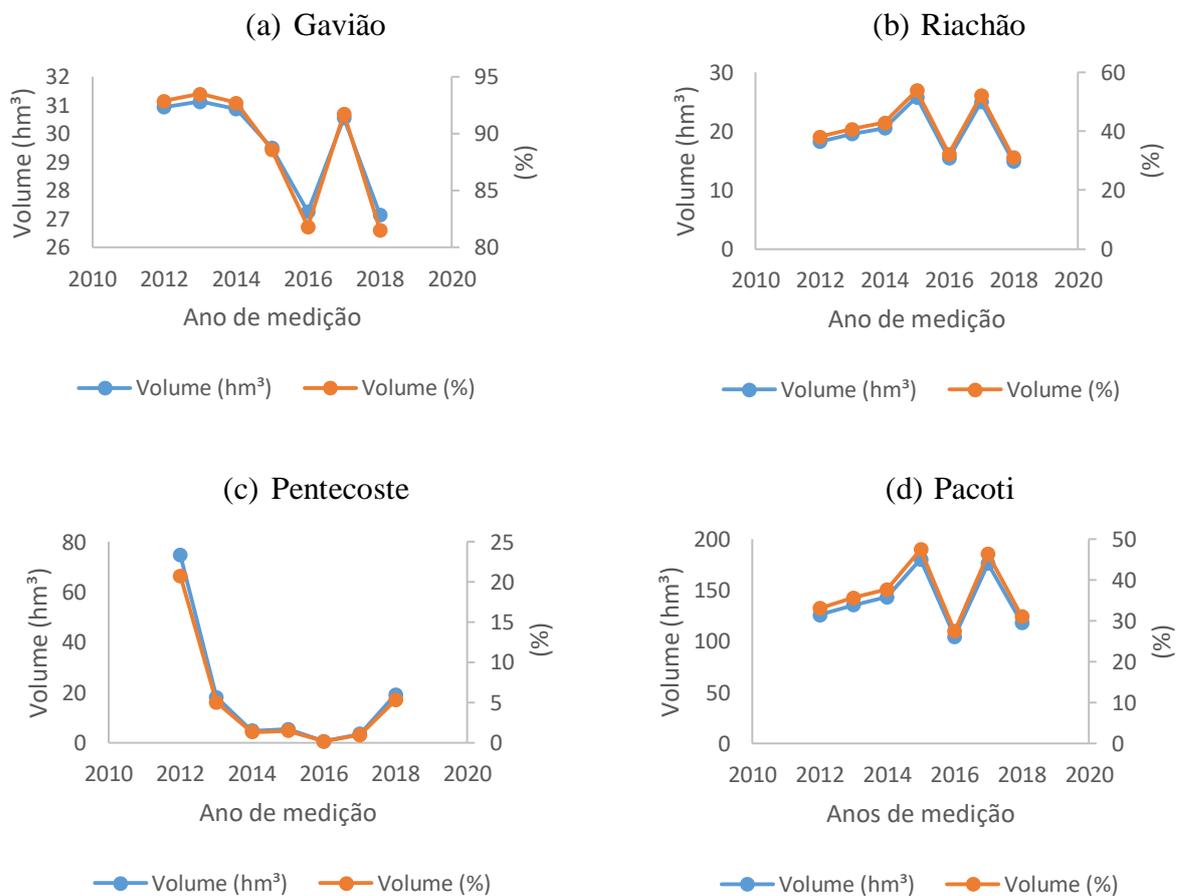
Por fim, obteve-se as correlações lineares de Pearson entre o ITS calculado e os parâmetros considerados nos reservatórios em estudo: percentuais de volume disponível nos reservatórios (%vol.), clorofila *a* (*cla*), cianobactérias (CB), oxigênio dissolvido (OD), nitrogênio total ( $N_T$ ), fósforo total ( $P_T$ ) e nutriente limitante (N:P). Os resultados permitiram inferir pontos relevantes acerca do comportamento do índice proposto, indicando quais variáveis se correlacionam melhor com o ITS.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Armazenamento hídrico dos reservatórios

As Figuras 3 (a), 3 (b), 3 (c) e 3 (d) mostram o volume armazenado de 2012 a 2018 para os reservatórios em estudo, medidos no final do primeiro semestre de cada ano (período chuvoso). Nota-se que há uma tendência de queda do volume armazenado nos reservatórios ao longo dos anos, apresentando valores mais críticos no ano de 2016, sobretudo para o Pentecoste que atingiu 0,14% de sua capacidade. Os valores foram obtidos pelo banco de dados da COGERH. O reservatório Riachão também se destaca por sua capacidade de armazenamento de 47,92 hm<sup>3</sup>, a maior capacidade dentre os reservatórios desse estudo, atingindo níveis críticos de, aproximadamente, 20% do volume.

**Figura 3.** Volume de água, medido no final do primeiro semestre de cada ano, para o reservatório Gavião, Riachão, Pacoti e Pentecoste

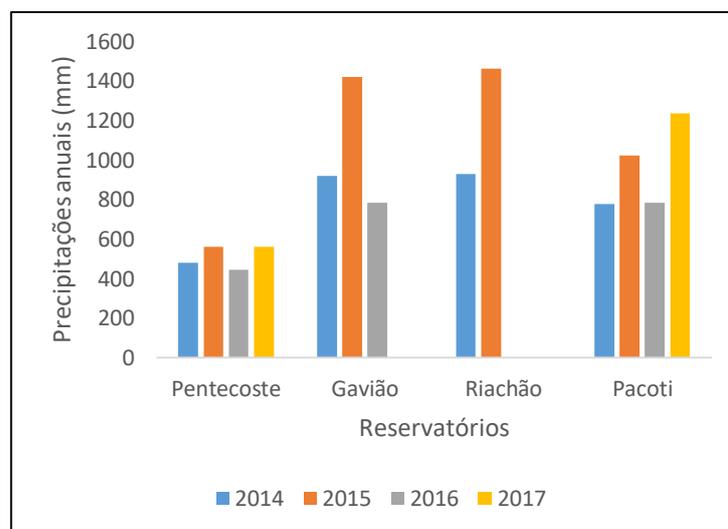


Fonte: Adaptado COGERH/FUNCEME (2018).

Wiegand *et al.* (2020) destacam que a grande maioria dos rios do semiárido tem características intermitentes, secando nos períodos em que não há a ocorrência de precipitações. Com isso, ocorre um aumento no período de retenção hidráulica nos reservatórios. Bouvy *et al.* (1999) citam que o longo tempo de retenção hidráulica, em geral dois anos, tornam os reservatórios do semiárido, locais favoráveis ao aumento das condições tróficas.

Bouvy *et al.* (1999) observaram que o agravamento das condições tróficas levando a florações de cianobactérias no semiárido, podem estar ligados à redução do volume de armazenamento dos reservatórios em decorrência de secas severas que podem estar relacionadas aos eventos *El Niño*. Na Figura 4, constam as precipitações anuais observadas nos reservatórios em estudo. Não foram registrados dados de precipitação entre 2016 a 2017 para o açude Riachão, e de 2017 para o Gavião. Verifica-se na Figura 4 que o Pentecoste apresenta os piores registros de precipitações, o que já era esperado com base nos percentuais críticos de volume disponível (Figura 3 c).

**Figura 4.** Precipitações anuais para os reservatórios em estudo



Fonte: Adaptado FUNCEME (2018).

#### 4.2 Análise estatística descritiva das variáveis consideradas no estudo

Na Tabela 7, constam os valores obtidos da análise estatística descritiva das variáveis para os quatro reservatórios. Os valores foram obtidos com base no banco de dados da COGERH, com 48 amostras coletadas para cada parâmetro. Os resultados obtidos com a média e do desvio padrão de cada parâmetro (Tabela 7), permitiram identificar elevadas

concentrações de cianobactérias, principalmente no segundo semestre do ano, período marcado pela escassez de precipitações.

A CONAMA N° 357/2005 classifica os corpos d'água com contagem de cianobactéria maior que 100.000 cel./mL como classe 4, valores que foram observados em todos os reservatórios em estudo, representados pela média (Tabela 7), evidenciando condições de elevada deterioração da qualidade das águas desses mananciais.

**Tabela 7.** Estatística descritiva para as variáveis dos reservatórios Riachão, Gavião, Pacoti e Pentecoste

| Reservatório | Variáveis       | Semestre 1 |               | Semestre 2 |               |
|--------------|-----------------|------------|---------------|------------|---------------|
|              |                 | Média      | Desvio padrão | Média      | Desvio padrão |
| Riachão      | CB              | 166674,13  | 106442,30     | 331702,38  | 178063,55     |
|              | Cl <sub>a</sub> | 33,59      | 32,90         | 40,97      | 24,85         |
|              | OD              | 7,41       | 0,75          | 7,25       | 0,32          |
|              | P <sub>T</sub>  | 0,12       | 0,05          | 0,12       | 0,06          |
|              | N <sub>T</sub>  | 1,35       | 0,98          | 1,25       | 0,44          |
| Gavião       | CB              | 170707,05  | 63186,89      | 210869,48  | 45427,18      |
|              | Cl <sub>a</sub> | 34,00      | 28,46         | 41,52      | 28,46         |
|              | OD              | 7,65       | 0,37          | 7,60       | 0,50          |
|              | P <sub>T</sub>  | 0,10       | 0,04          | 0,08       | 0,04          |
|              | N <sub>T</sub>  | 1,47       | 0,56          | 1,31       | 0,44          |
| Pacoti       | CB              | 150369,75  | 88141,30      | 196929,29  | 105220,45     |
|              | Cl <sub>a</sub> | 37,37      | 30,47         | 44,11      | 23,15         |
|              | OD              | 7,77       | 0,80          | 7,78       | 0,61          |
|              | P <sub>T</sub>  | 0,12       | 0,07          | 0,12       | 0,06          |
|              | N <sub>T</sub>  | 1,26       | 0,74          | 1,33       | 0,63          |
| Pentecoste   | CB              | 292213,25  | 242668,03     | 213671,13  | 173931,80     |
|              | Cl <sub>a</sub> | 95,75      | 16,20         | 82,02      | 55,47         |
|              | OD              | 5,13       | 1,73          | 6,14       | 0,98          |
|              | P <sub>T</sub>  | 4,23       | 1,71          | 3,90       | 3,60          |
|              | N <sub>T</sub>  | 0,25       | 0,13          | 0,15       | 0,08          |

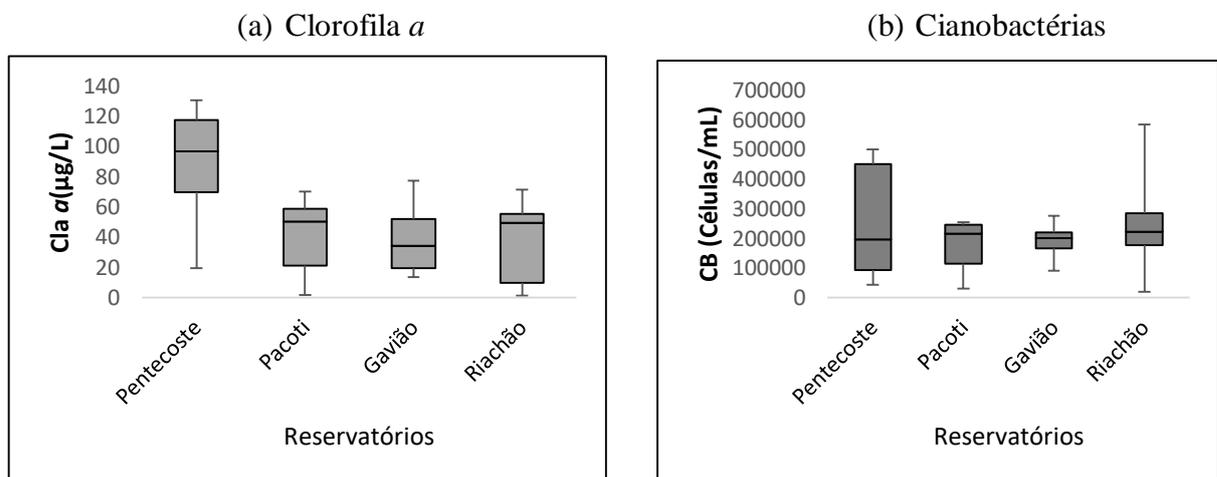
Fonte: Produzido pela autora (2021).

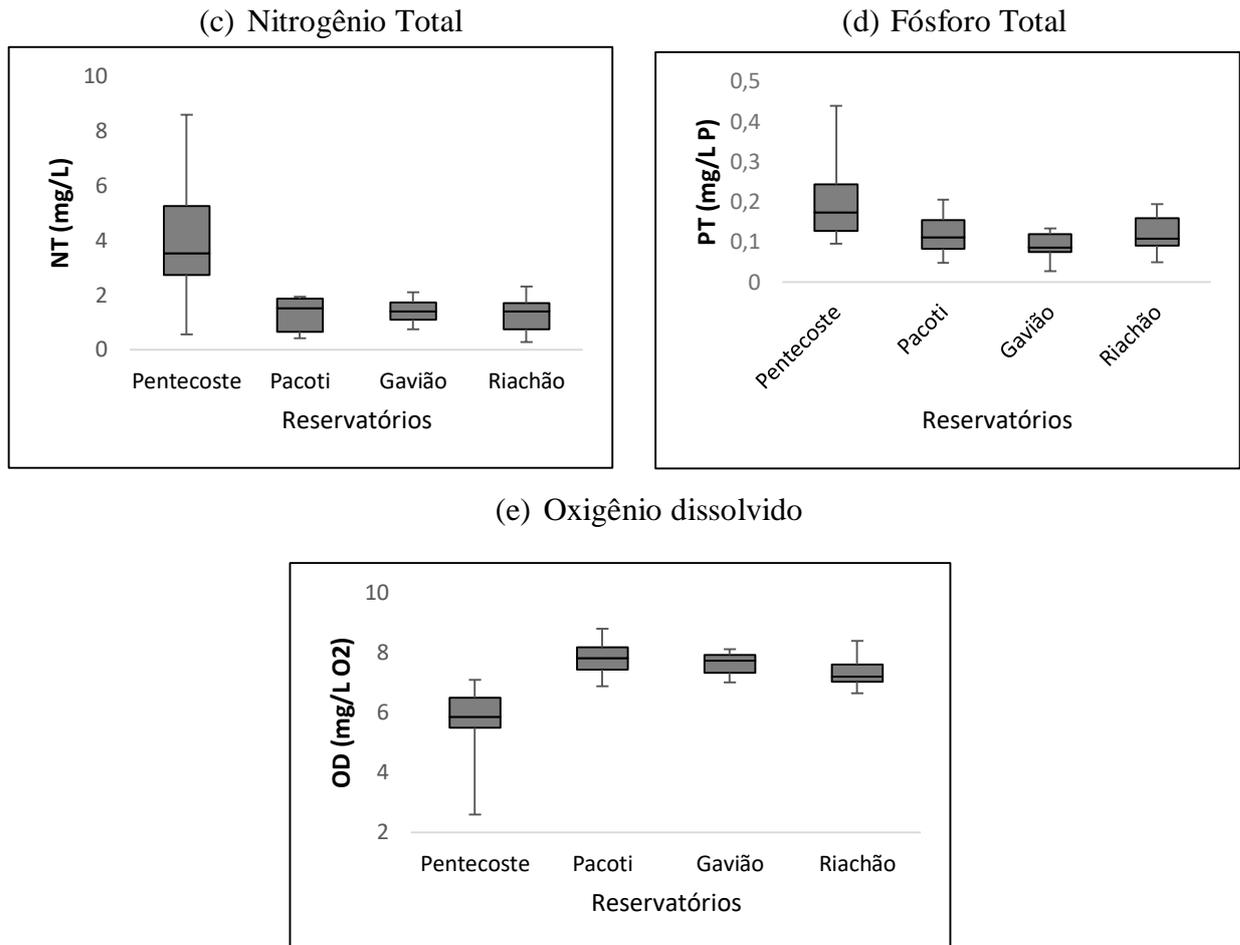
Figueiredo *et al.* (2007) destacam que os reservatórios cearenses sofrem elevada vulnerabilidade ambiental para a ocorrência dos fenômenos de eutrofização pelo agravamento de suas particularidades ambientais, através do lançamento de nutrientes provenientes do esgoto doméstico, atividades pecuárias e piscicultura.

Das variáveis previamente selecionadas, realizou-se uma análise do comportamento dos parâmetros de estudo através do gráfico Boxplot (Figura 5), permitindo analisar a concentração e distribuição dos dados em cada reservatório.

Observa-se que a partir da análise da Figura 5 (a), a concentração de clorofila *a* oscilou consideravelmente para o reservatório Pentecoste, apresentando valores mínimos e máximos variando entre 19,2 a 130,38  $\mu\text{g/L}$ , com média de 95,75  $\mu\text{g/L}$  e desvio padrão de 16,20  $\mu\text{g/L}$ . Os limites máximos de clorofila *a* são regulamentados pela Resolução CONAMA N° 357/2005, em que estabelece o limite 60  $\mu\text{g/L}$ , para a classe 3. Avalia-se que os demais parâmetros também apresentaram valores elevados para Pentecoste, comparados aos demais reservatórios.

**Figura 5.** Boxplot da concentração dos parâmetros (a) clorofila *a*, (b) cianobactérias, (c) nitrogênio total, (d) fósforo total e (e) oxigênio dissolvido, para os reservatórios Riachão, Pacoti, Gavião e Pentecoste





Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Verifica-se ainda que, para o Pentecoste, as concentrações de oxigênio dissolvido apresentam grande variação, chegando a atingir concentrações críticas de 2,58 mg/L, um fenômeno já esperado com base no comportamento majoritário das variáveis, ocorrendo consumo de OD com o aumento da atividade primária. O OD é de fundamental importância para avaliação das condições ambientais dos corpos d'água e a produtividade primária é associada aos parâmetros: N e P (parâmetros relacionados à causa do aumento da produtividade primária) clorofila e cianobactérias (parâmetros relacionados diretamente à produtividade primária, representando uma resposta). A presença do OD é indicativa de condições aeróbias, detectando a presença de compostos orgânicos (ESTEVES, 1998).

### 4.3 Proposição do índice ITS pela Análise das Componentes Principais – PCA

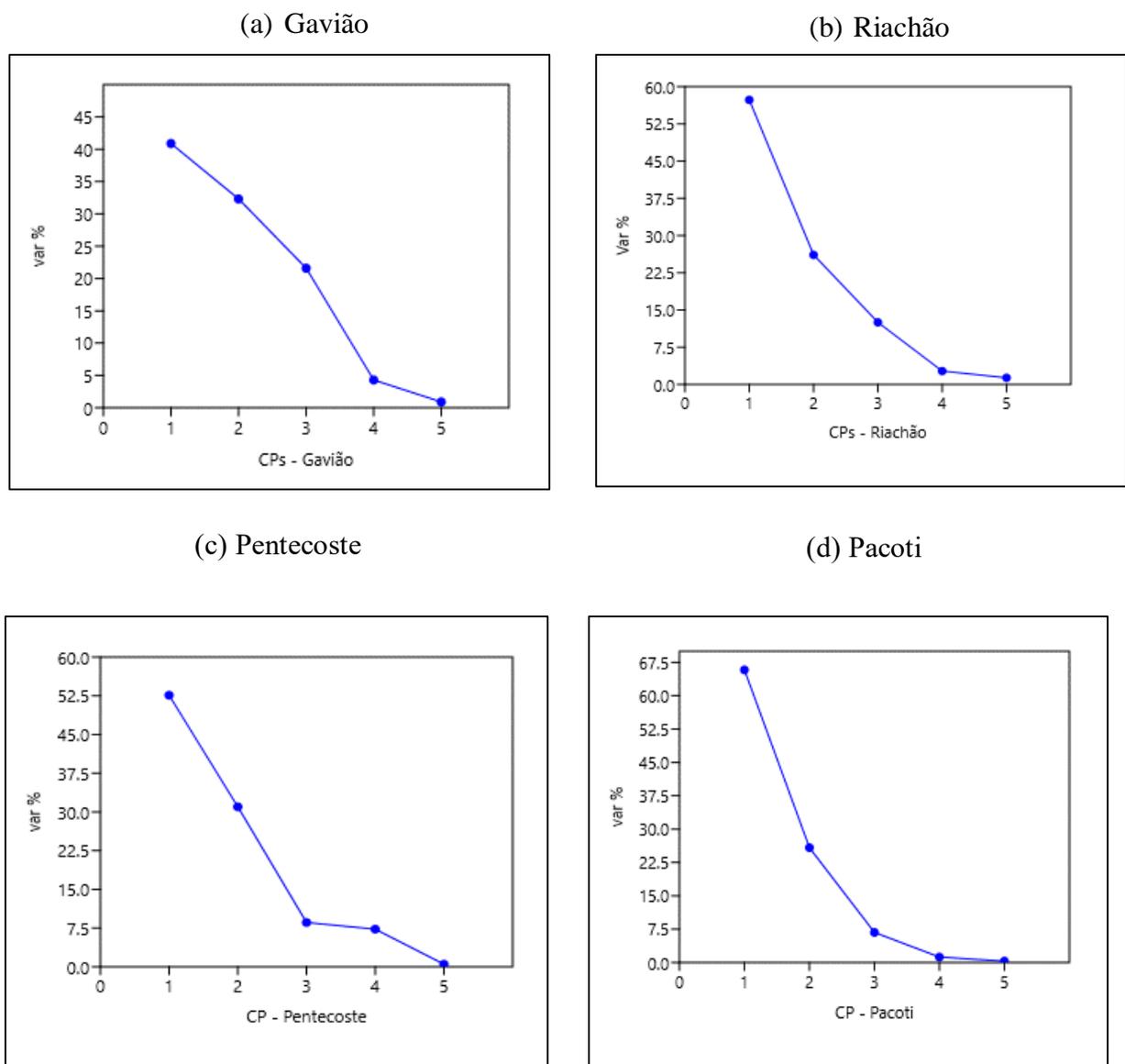
#### 4.3.1 Obtenção do peso das componentes

Dos parâmetros selecionados previamente, observou-se após a PCA, baixos valores de correlação para as variáveis turbidez, temperatura da água e ortofosfato solúvel, sendo

portanto, excluídos da análise por apresentarem pouca significância e, poderiam acarretar erros associados a tendências nos parâmetros de estudo.

A análise da Figura 6 permite visualizar o percentual de variância para cada PC obtida na análise multivariada, o que subsidiou a escolha da componente estatisticamente significativa. Nota-se que a PC1 apresentou resultados mais satisfatórios para a análise dos reservatórios Gavião, Riachão, Pentecoste e Pacoti, apresentando, respectivamente, percentuais de variância 40,89%, 59,23%, 65,81% e 61,5%.

**Figura 6.** Percentual de variância das componentes principais obtida pela PCA para cada reservatório em estudo



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Considerando o critério Kaiser (1958) para a escolha da componente principal em que os autovalores possuem valores maiores que a unidade ( $AV > 1$ ) (Hongyu *et al.* 2015). Na Tabela 8, as componentes com maiores variâncias coincidem com os maiores valores de autovalores, representando, respectivamente, para os reservatórios Gavião, Pentecoste, Pacoti e Riachão os valores 2,04, 3,07, 3,29, 3,01 para a PC1.

Portanto, a componente principal (CP) escolhida é que representa maior variância e maiores autovalores correspondentes no conjunto de dados, explicando de maneira mais adequada o comportamento das variáveis para os quatro reservatórios. A Tabela 8 apresenta uma síntese dos resultados obtidos com a PCA, a PC1 obteve maior percentual de variância (%var), e maior autovalor (AV), nos quatro reservatórios em estudo.

**Tabela 8.** Síntese dos valores obtidos com a PCA, para os quatro reservatórios em estudo

| Variáveis             | Peso das Componentes Principais |              |              |             |              |             |              |              |
|-----------------------|---------------------------------|--------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|--------------|
|                       | Gavião                          |              | Pentecoste   |             | Pacoti       |             | Riachão      |              |
|                       | PC1                             | PC2          | PC1          | PC2         | PC1          | PC2         | PC1          | PC2          |
| <b>CB</b>             | 0,13                            | <b>-0,28</b> | <b>0,44</b>  | 0,14        | <b>0,47</b>  | 0,17        | 0,22         | <b>0,74</b>  |
| <b>Cl<sub>a</sub></b> | -0,33                           | <b>0,67</b>  | -0,05        | <b>0,84</b> | <b>0,53</b>  | 0,18        | <b>0,55</b>  | 0,04         |
| <b>OD</b>             | <b>0,63</b>                     | 0,05         | <b>0,54</b>  | 0,17        | -0,04        | <b>0,86</b> | 0,36         | <b>-0,57</b> |
| <b>N<sub>T</sub></b>  | <b>0,64</b>                     | 0,13         | <b>0,54</b>  | 0,17        | <b>0,47</b>  | -0,41       | <b>0,47</b>  | 0,26         |
| <b>P<sub>T</sub></b>  | 0,20                            | <b>0,66</b>  | <b>-0,46</b> | 0,44        | <b>0,51</b>  | 0,10        | <b>0,53</b>  | -0,20        |
| <b>%var</b>           | <b>40,89</b>                    | 32,31        | <b>61,5</b>  | 26,52       | <b>65,81</b> | 25,83       | <b>59,23</b> | 24,27        |
| <b>AV</b>             | <b>2,04</b>                     | 1,616        | <b>3,07</b>  | 1,32        | <b>3,29</b>  | 1,29        | <b>3,012</b> | 1,24         |

AV- Autovalor correspondente da PC selecionada; %var – percentual de variância explicada pela PC.

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Na Tabela 8, os pesos representativos na análise de cada componente (*loadings*) estão destacados para cada variável. Nota-se que os pesos negativos representam uma correlação negativa entre os parâmetros. Nos reservatórios Gavião, Pentecoste, Pacoti e Riachão, os valores obtidos com a PC1 e PC2 somadas representam, respectivamente, 73,2%, 88,02%, 91,64% e 83,5% da variância dos dados. A retenção de componentes na análise depende da proporção de explicação da variância total, sendo possível utilizar como critério modelos que expliquem até 80% da variação total (Johnson; Wichern, 1998 *apud* Hongyu, 2015).

O reservatório Gavião apresentou baixa variância para a PCs selecionadas (73,2%), evidenciando que os critérios de escolha da PC apresentam suas limitações devido à

complexidade da análise multivariada, em que as PCs são obtidas de maneira independente indicando o comportamento do objeto de estudo a depender da modelagem das variáveis ambientais presentes no meio. Um outro ponto importante a destacar é que a PC1 não obteve pesos significativos para a contagem de cianobactérias para o Gavião ( $p = 0,13$ ) e para o Riachão ( $p = 0,22$ ). Já em relação à CP2, no reservatório Riachão, verificou-se que o peso obtido com a contagem de cianobactérias apresentou um valor significativo ( $p = 0,74$ ), enquanto que na CP1 o peso foi menos significativo ( $p = 0,22$ ).

#### 4.3.2 Classificação trófica dos reservatórios

Os reservatórios encontram-se em sua maioria com elevado nível de eutrofização, principalmente no segundo semestre do ano, período caracterizado como seco. O período considerado neste estudo (2014 a 2017) foi marcado pela ocorrência de uma crise hídrica no Nordeste brasileiro, citada em diversos estudos (Santos *et al.*, 2012; Gondim *et al.*, 2017), possivelmente em decorrência do fenômeno *El Niño*, onde inúmeros reservatórios cearenses passaram a operar com seu volume morto, gerando um colapso no sistema de abastecimento. Gondim *et al.* (2017) citam que a anomalia climática observada nesse período (2012 a 2018), foi caracterizada como uma das piores já registradas.

Os valores obtidos no cálculo do ITS com base nos parâmetros de qualidade água: OD,  $N_T$ ,  $P_T$ , Cla e CB estão evidenciados na Tabela 9. Os reservatórios Pacoti e Riachão tiveram aumento significativo do estado trófico, passando da condição de oligotrófico/mesotrófico para hipereutrófico ao longo dos semestres, com elevados níveis de eutrofização.

**Tabela 9.** Resultados do ITS e suas respectivas classificações trófica para os reservatórios em estudo, obtidos através dos pesos ponderados pela PCA

| Período | ITS        |        |         |        |
|---------|------------|--------|---------|--------|
|         | Pentecoste | Pacoti | Riachão | Gavião |
| 2014.1  | 6,055      | 0,776  | 2,320   | 1,02   |
| 2014.2  | 10,632     | 1,369  | 1,206   | 1,44   |
| 2015.1  | 7,619      | 4,507  | 2,192   | 0,35   |
| 2015.2  | 7,394      | 8,990  | 5,675   | 1,08   |
| 2016.1  | 8,618      | 12,021 | 11,297  | 3,37   |
| 2016.2  | 8,621      | 10,836 | 4,560   | 2,54   |

|        |       |        |       |      |
|--------|-------|--------|-------|------|
| 2017.1 | 3,441 | 12,928 | 6,591 | 3,93 |
| 2017.2 | 4,764 | 12,596 | 6,032 | 2,98 |

Legenda: Oligotrófico Mesotrófico Eutrófico Hipereutrófico

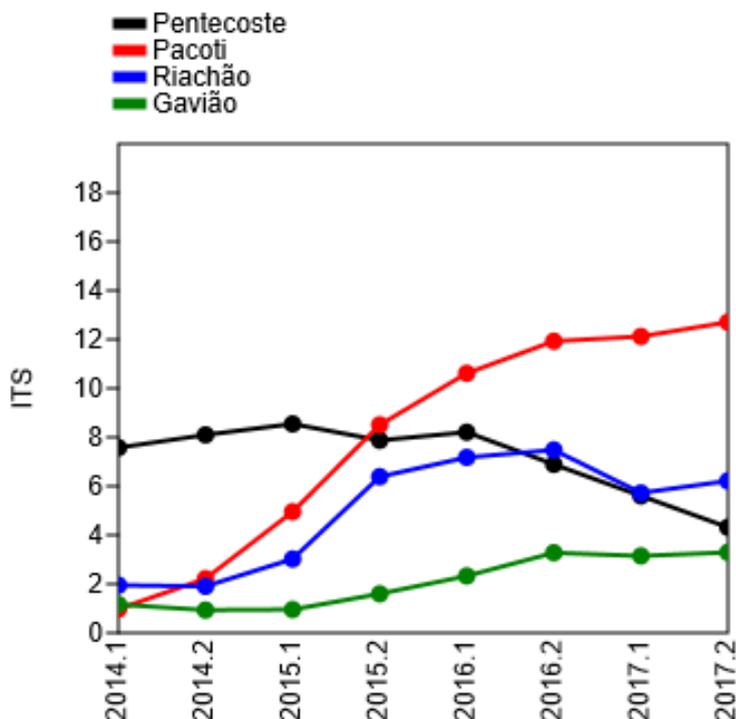
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Pentecoste, no entanto, apresentou uma melhora ao longo do tempo. No segundo semestre de 2014 encontrava-se em uma situação mais crítica, hipereutrófico (ITS = 10,63), passando para um estado de menor eutrofização, eutrófico, no primeiro semestre de 2017 (ITS = 3,44).

As diferenças observadas no ITS entre os reservatórios podem ser explicadas pelas variações espaciais em detrimento das características ambientais, presentes em cada bacia hidrográfica que compõem o estudo. Os reservatórios Pacoti, Riachão e Gavião, que compõem a bacia metropolitana, apresentaram similaridades entre as classificações tróficas. Pentecoste, no entanto, localiza-se na bacia hidrográfica do Curu, onde os efeitos da seca são mais severos e os regimes pluviométricos mais irregulares e escassos. Os valores obtidos do ITS para o açude Pentecoste apresenta um perfil distinto dos demais reservatórios.

A Figura 7 é uma representação dos valores obtidos com o ITS ao longo do tempo. Observa-se que o Pacoti apresentou pior estado de eutrofização, seguido do Pentecoste e do Riachão, uma possível justificativa seria a contaminação difusa oriunda do lixão que fica nas proximidades do barramento Pacoti, gerando impactos negativos diretos na qualidade da água. O Gavião apresentou baixa variação nos valores do ITS apesar de ter sido classificado nas três escalas tróficas (mesotrófico/eutrófico/hipereutrófico).

**Figura 7.** Representação do ITS dos reservatórios Gavião, Pacoti, Riachão e Pentecoste, obtidos em seus respectivos períodos



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

É possível uma análise comparativa com Lima (2019), que utilizou o coeficiente de variação para obter os pesos das variáveis, entre os anos de 2014 ao primeiro semestre de 2018, para os reservatórios do semiárido, coincidindo com o período (2014 a 2017) e o reservatório (Gavião), do presente estudo. Para o Gavião, o supracitado autor obteve maiores classificações tróficas, indicando uma piora da qualidade da água comparada a esse estudo.

Lima (2019) nos períodos compreendidos entre o primeiro semestre de 2014 ao segundo semestre de 2015, obteve a classificação trófica, eutrófico ( $2,8 \leq IET_{MSA} \leq 3,2$ ), para o açude Gavião. E, nesse mesmo período, os resultados obtidos neste estudo indicaram a condição de oligotrófica ( $0,35 \leq ITS \leq 1,44$ ), para o mesmo reservatório. Em contrapartida, no primeiro semestre de 2016 ao segundo semestre de 2017 o Gavião variou entre eutrófico e hipereutrófico ( $3,4 \leq IET_{MSA} \leq 4,0$ ) para Lima (2019), coincidido com a classificação obtida neste estudo ( $2,54 \leq ITS \leq 3,93$ ). Uma das justificativas seria o fato de que a PC1 para o reservatório Gavião apresentou baixo peso para a variável cianobactéria,  $p = 0,1398$  (Tabela 9). A metodologia adotada no presente estudo, comparada ao estudo de Lima (2019), possui maior sensibilidade às variações nos parâmetros de análise e, com isso, classifica os reservatórios com maiores níveis de categorias tróficas. É importante destacar que a dinamicidade que ocorre nos

reservatórios pode implicar em alterações na qualidade das águas, visto que recebem contribuições de outros reservatórios, garantindo a segurança hídrica na capital cearense (VIDAL; CAPELO NETO, 2014.)

Realizou-se o teste ANOVA, para observar se houveram diferenças significativas ( $\rho < 0,05$ ) na classificação trófica entre os reservatórios. Os valores observados indicaram diferenças significativas ( $\rho = 0,005727$ ) entre os reservatórios. Em seguida, realizou-se o teste Tukey, visando apontar quais os reservatórios apresentaram essas diferenças, evidenciando que somente o Gavião, apresentou diferenças relevantes na classificação trófica quando comparado ao Pentecoste ( $\rho = 0,0224$ ) e ao Pacoti ( $\rho = 0,0062$ ). Observa-se que o Gavião possui certa uniformidade na variação do ITS quando comparado aos demais reservatórios.

O período chuvoso concentra-se no primeiro semestre do ano, e para avaliar se houveram diferenças significativas entre os períodos sazonais na classificação trófica, realizou-se, mais uma vez, o teste ANOVA ( $\rho < 0,05$ ), onde pode-se identificar a incoerência de diferenças estatísticas significativas na dinâmica trófica em função do tempo ( $\rho = 0,336$ ). Bianchi *et al.* (2019) obtiveram resultados semelhantes por meio dos resultados do teste de Wilcoxon pareado, inobservadas diferenças significantes entre o período seco e chuvoso para o estado trófico ( $\rho > 0,05$ ).

#### 4.3.3 Relação entre o ITS obtido e os percentuais de volume disponível nos reservatórios

Rocha Júnior *et al.* (2018) verificaram que as precipitações pluviométricas afetam diretamente a qualidade da água e os índices de estado trófico dos reservatórios do semiárido brasileiro, e esses efeitos são maximizados pela redução de volume disponível de água, um fenômeno comum na região.

Brasil *et al.* (2016) citam que as precipitações possuem um papel fundamental no carreamento de nutrientes para os corpos d'água. No entanto, apesar da falta de precipitações nos reservatórios no período seco, os supracitados autores destacam o aumento da concentração de nutrientes em decorrência dos fenômenos internos (evaporação, decomposição interna e carreamento interno).

A Tabela 10 apresenta relação dos índices tróficos com a variação do volume nos reservatórios. Verifica-se que houve uma piora no estado trófico em detrimento da redução da fração de volume disponível.

**Tabela 10.** ITS, classificação trófica e fração de volume disponível para os reservatórios em seus respectivos períodos

| <b>Reservatório</b> | <b>Período</b> | <b>ITS</b> | <b>Classificação</b> | <b>Fração de vol. disponível (%)</b> |
|---------------------|----------------|------------|----------------------|--------------------------------------|
| <b>Gavião</b>       | 2014.1         | 1,02       | Oligotrófico         | 92,7                                 |
|                     | 2014.2         | 1,44       | Oligotrófico         | 93,47                                |
|                     | 2015.1         | 0,35       | Oligotrófico         | 85,46                                |
|                     | 2015.2         | 1,08       | Oligotrófico         | 82                                   |
|                     | 2016.1         | 3,37       | Eutrófico            | 79,2                                 |
|                     | 2016.2         | 2,54       | Eutrófico            | 81,07                                |
|                     | 2017.1         | 3,93       | Hipereutrófico       | 82                                   |
|                     | 2017.2         | 2,98       | Eutrófico            | 82,43                                |
| <b>Riachão</b>      | 2014.1         | 2,32       | Mesotrófico          | 42,89                                |
|                     | 2014.2         | 1,21       | Oligotrófico         | 34,05                                |
|                     | 2015.1         | 2,19       | Mesotrófico          | 53,59                                |
|                     | 2015.2         | 5,67       | Hipereutrófico       | 38,93                                |
|                     | 2016.1         | 11,3       | Hipereutrófico       | 32,26                                |
|                     | 2016.2         | 4,56       | Hipereutrófico       | 30,66                                |
|                     | 2017.1         | 6,59       | Hipereutrófico       | 52,12                                |
|                     | 2017.2         | 6,03       | Hipereutrófico       | 25,09                                |
| <b>Pacofi</b>       | 2014.1         | 0,78       | Oligotrófico         | 37,67                                |
|                     | 2014.2         | 1,37       | Oligotrófico         | 29,18                                |
|                     | 2015.1         | 4,51       | Hipereutrófico       | 47,39                                |
|                     | 2015.2         | 8,99       | Hipereutrófico       | 33,87                                |
|                     | 2016.1         | 12,02      | Hipereutrófico       | 27,45                                |
|                     | 2016.2         | 10,89      | Hipereutrófico       | 9,94                                 |
|                     | 2017.1         | 12,93      | Hipereutrófico       | 46,27                                |
|                     | 2017.2         | 12,6       | Hipereutrófico       | 15,51                                |
| <b>Pentecoste</b>   | 2014.1         | 6,05       | Hipereutrófico       | 3,33                                 |
|                     | 2014.2         | 10,63      | Hipereutrófico       | 1,29                                 |
|                     | 2015.1         | 7,62       | Hipereutrófico       | 3,47                                 |
|                     | 2015.2         | 7,39       | Hipereutrófico       | 1,48                                 |
|                     | 2016.1         | 8,62       | Hipereutrófico       | 1,01                                 |
|                     | 2016.2         | 8,62       | Hipereutrófico       | 0,14                                 |
|                     | 2017.1         | 3,44       | Eutrófico            | 0,09                                 |
|                     | 2017.2         | 4,76       | Hipereutrófico       | 0,95                                 |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Os dados de volume foram coletados no banco de dados da FUNCEME (2018), considerando as médias semestrais de cada período. Nota-se na Tabela 10, que o pior valor observado de fração de volume disponível foi para o reservatório Pentecoste, chegando a atingir 0,09% de sua capacidade e, predominantemente, foi classificado como hipereutrófico.

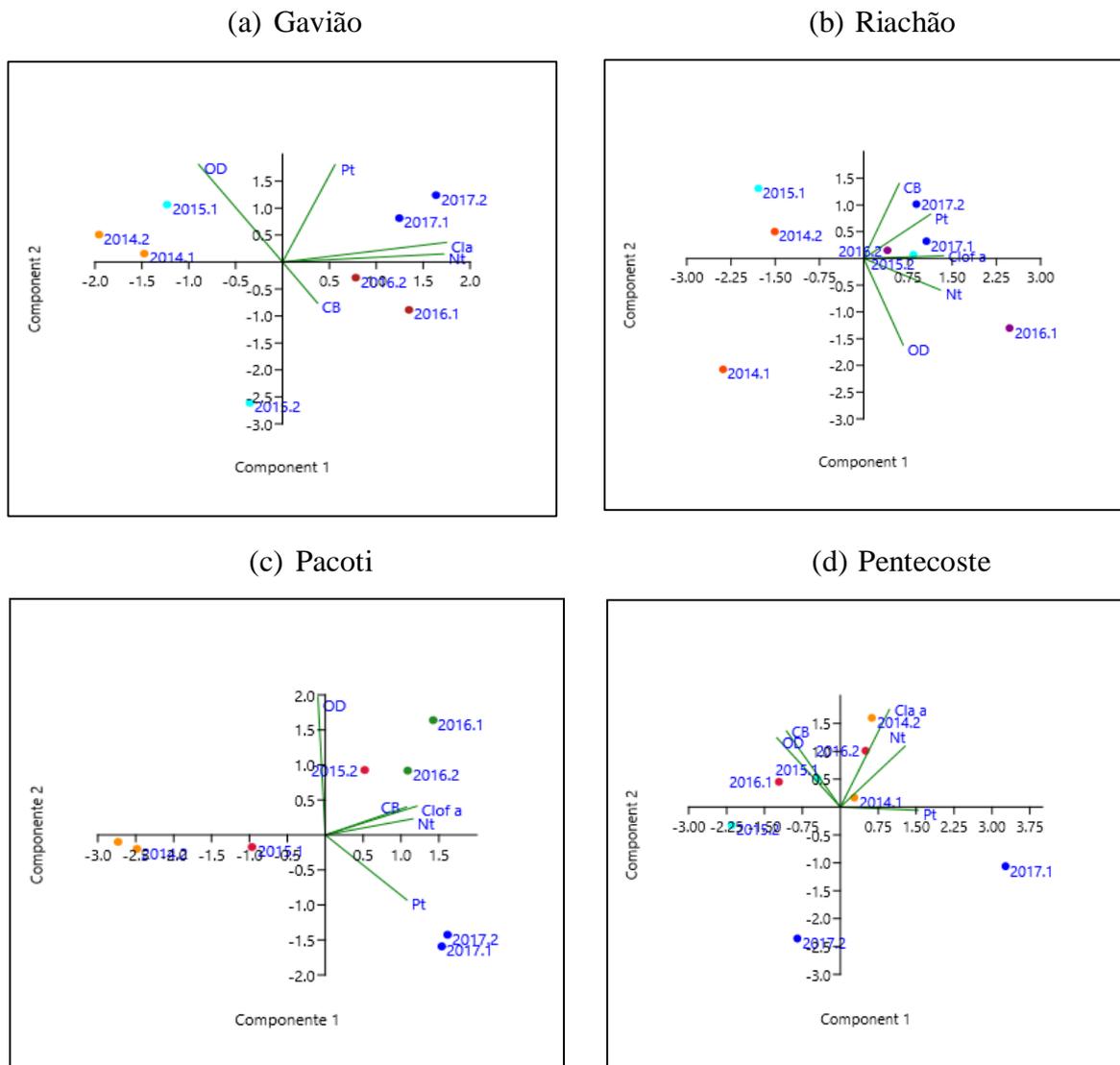
Entretanto, o reservatório Gavião apresentou os menores valores da classificação trófica entre todos ( $0,35 \leq ITS \leq 3,93$ ), coincidindo com os maiores percentuais de volume disponíveis variando entre 92 e 79%.

#### 4.5 Estudo do comportamento das variáveis

As análises do comportamento das variáveis foram obtidas com auxílio do gráfico *scatter plot*, utilizando o recurso *biplot* do Past, conforme evidenciado na Figura 8. Observa-se a relação entre os valores dos *scores* e *loadings*, obtidos através das PC1 e PC2 para as variáveis dos reservatórios em estudo. No eixo *x* da PC1, existe uma tendência no aumento da concentração de clorofila *a*, associada ao aumento de nitrogênio total e fósforo total, indicando presença de organismos fixadores de nitrogênio. Nota-se que esse fenômeno ocorre em todos os açudes. Em seu estudo sobre índice de estado trófico, Lamparelli (2004) observou esse comportamento, obtendo alta correlação entre as concentrações de nitrogênio e fósforo associados ao aumento da concentração de clorofila *a*.

A fixação de nitrogênio nos ambientes aquáticos ocorre pela atividade metabólica dos organismos que compõem o meio. Algas cianofíceas são as principais responsáveis pela fixação por estarem presentes em maior concentração, sobretudo em ambientes eutrofizados (ESTEVES, 1998).

Paralelamente, pode-se observar correlação negativa entre enriquecimento por fósforo e nitrogênio e os níveis de oxigênio dissolvido no corpo d'água, notadamente no reservatório Gavião (Figura 8 a). Um fenômeno já esperado, pois o aumento da atividade primária, acarreta em maior consumo de oxigênio no meio.

**Figura 8.** Biplot CP1 x CP2 sobre as variáveis de qualidade de água nos reservatórios pela PCA

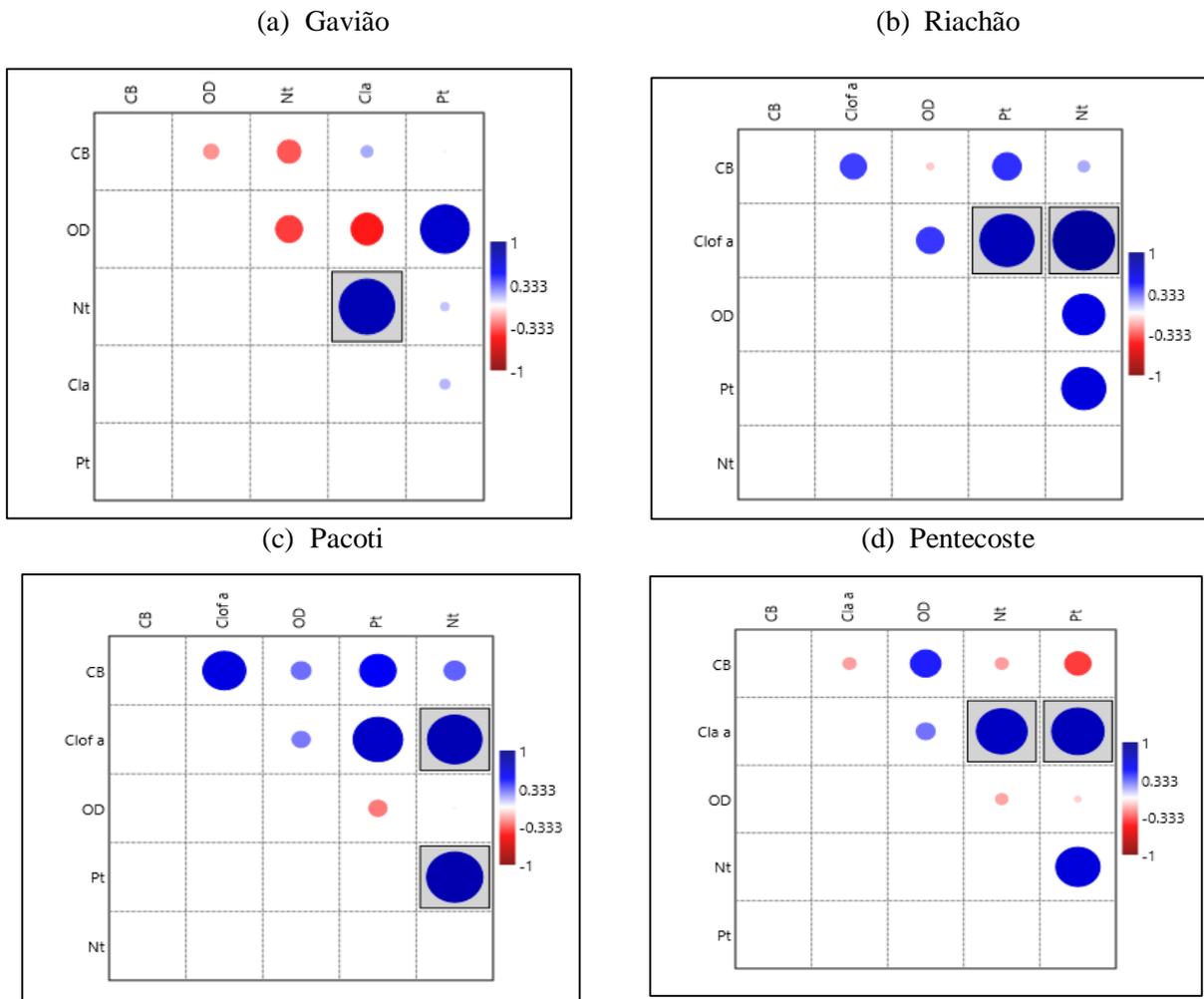
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Observa-se ainda na Figura 8 (a, b e c), que os períodos compreendidos entre 2014.1 a 2015.2 para os reservatórios Gavião, Riachão e Pacoti apresentaram pouca influência na análise, o que já era esperado, visto que os valores obtidos com o ITS indicam uma piora no estado trófico ao longo dos anos nesses reservatórios. Pentecoste, no entanto, apresenta um perfil distinto dos demais reservatórios, apresentando uma melhora ao longo dos anos como evidenciado na Figura 8 (d), em que os períodos iniciais apresentam maior influência no comportamento das variáveis.

Na Figura 9 mostra-se a correlação de Spearman ( $1 \leq \rho \leq -1$ ), obtida através da análise multivariada entre as variáveis dos reservatórios em estudo. Nota-se, mais uma vez, uma forte correlação positiva entre o aumento da concentração de clorofila *a* e a concentração de

nitrogênio e fósforo total. Os valores destacados apresentam maior nível de significância ( $\rho < 0,05$ , *boxed*).

**Figura 9.** Correlação entre as variáveis dos reservatório em estudo (a) Gavião, (b) Riachão, (c) Pacoti e (d) Pentecoste



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Observa-se na Figura 9 que os reservatórios Pacoti, Riachão e Pentecoste apresentaram elevada correlação entre as concentrações de fósforo e nitrogênio, apresentando valores próximos a 1. No entanto, o Gavião apresentou correlação quase nula entre  $P_T$  e  $N_T$  ( $\rho = 0,11$ ). Um outro aspecto distinto do comportamento dos demais reservatórios, observado no Gavião, identificada na Figura 9 (a), foi a baixa correlação entre clorofila *a* e fósforo total ( $\rho = 0,14$ ) e alta para clorofila *a* e nitrogênio total ( $\rho = 0,82$ ). Nos demais reservatórios, observa-se elevado nível de significância entre clorofila *a* e fósforo total ( $\rho < 0,05$ , *boxed*). Essa análise pode ser um indicativo da ocorrência de limitação da comunidade aquática do Gavião, por nitrogênio total.

#### 4.6 Análise do nutriente limitante

Von Sperling (2000) descreve o processo de eutrofização como um fenômeno modelado pelas concentrações de fósforo e nitrogênio disponível no meio, obtidos a partir de uma análise estequiométrica, considerando suas concentrações molares. A Tabela 11 apresenta os valores obtidos no cálculo do nutriente limitante para os reservatórios em estudo.

Redfield (1968) desenvolveu uma metodologia para a determinação do nutriente limitante nos ecossistemas aquáticos, denominado como a razão de Redfield, tomando como base as concentrações molares da biomassa algal ( $C_{106}H_{118}O_{45}N_{16}P_1$ ), indicando que se a relação  $N_T/P_T$  é maior que 16,  $P_T$  é limitante. Se o inverso ocorre,  $N_T$  é o limitante.

Elevada correlação entre as concentrações de clorofila *a* e de fósforo e nitrogênio total, pode ser uma das evidências do aumento de organismos fixadores de nitrogênio (ESTEVES, 1998). Esse fenômeno pode ser um indicativo de que o nitrogênio total é limitante no meio (SCHINDLER *et al.*, 2008 *apud* BRASIL *et al.*, 2016). Entretanto, os resultados obtidos para os reservatórios em estudo (Tabela 11), indicam que apesar do indicativo de aumento de organismos fixadores de nitrogênio no meio, os resultados da relação N:P evidenciam que o fósforo total e o nitrogênio total atuam como colimitantes da produtividade primária.

É importante destacar que apesar do nitrogênio ter se comportado como limitante em alguns períodos, destacados na Tabela 11, o fósforo se apresentou como principal limitante ( $N/P > 16$ ). Wiegand *et al.* (2020) obtiveram resultados similares em reservatórios do semiárido.

**Tabela 11.** Valores obtidos na relação N:P para os reservatórios em estudo, para o primeiro e segundo semestre do ano

| Campanha      |        | Relação N:P  |              |              |              |
|---------------|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|               |        | Gavião       | Pacoti       | Riachão      | Pentecoste   |
| Semestre<br>1 | 2014.1 | 51,04        | 32,62        | 34,69        | 28,60        |
|               | 2015.1 | <b>13,95</b> | <b>14,00</b> | <b>6,00</b>  | 39,91        |
|               | 2016.1 | 45,71        | 29,87        | 31,90        | 54,65        |
|               | 2017.1 | 39,06        | 20,86        | 28,41        | 34,06        |
| Semestre<br>2 | 2014.2 | 19,22        | <b>14,23</b> | 22,51        | 133,01       |
|               | 2015.2 | 96,18        | 29,27        | 32,40        | <b>12,23</b> |
|               | 2016.2 | 40,75        | 37,38        | 30,48        | 40,48        |
|               | 2017.2 | 31,45        | 16,98        | <b>15,44</b> | 38,75        |

N/P < 16 (valores destacados em negrito), nitrogênio como principal limitante

N/P > 16, fósforo como principal limitante

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Vidal e Campelo Neto (2014) realizaram estudo de balanço de macro nutrientes no reservatório Gavião, obtendo razões baixas (N/P < 10), indicando limitação por nitrogênio total. De acordo com os autores, uma possível explicação para esse fenômeno seria a precipitação do fósforo retendo massas de fósforo no sedimento.

O aumento da concentração de organismos fixadores de nitrogênio no meio, desencadeia aumento do nitrogênio total disponível no reservatório. O fósforo, entretanto, devido à falta de precipitações, que é a principal forma de entrada para os reservatórios através do carreamento desses nutrientes, reduzindo as fontes difusas de contaminação e com a redução das ressuspensões na coluna de água, encontra-se em menores concentrações. De acordo com a FUNCEME (2002), o fósforo, na maioria dos reservatórios, tem se comportado como nutriente limitante, pois como mencionado, o nitrogênio está disponível na atmosfera, o que favorece sua captura para algumas espécies fitoplânctônicas, em condições extremas.

#### **4.7 Análise de correlações do ITS entre os parâmetros analisados**

Para subsidiar a análise dos resultados obtidos com o ITS e os parâmetros de qualidade de água considerados nos reservatórios em estudo, obtiveram-se as correlações lineares de Pearson entre os mesmos, observados na Tabela 12.

A análise da Tabela 12 permite inferir uma forte correlação entre o ITS calculado e a concentração de nitrogênio total para os reservatórios Gavião ( $r = 0,9165$ ), Riachão ( $r = 0,9163$ ) e Pacoti ( $r = 0,9415$ ), exceto para o reservatório Pentecoste ( $r = -0,49$ ).

Verifica-se que apesar do Pacoti e, principalmente, o Pentecoste, terem apresentado baixa correlação entre o ITS e o percentual de volume disponível  $r = -0,33$  e  $r = 0,096$ , respectivamente, esses reservatórios apresentaram os maiores valores da classificação trófica e são também os que possuem menores volumes. Não se observou correlações estatisticamente significativas entre o ITS obtido e o nutriente limitante.

**Tabela 12.** Valores das correlações obtidas entre o ITS e as variáveis dos reservatórios em estudo

| <b>Reservatório</b> | <b>Parâmetros</b>           | <b>Coefficiente de Pearson (r)</b> |
|---------------------|-----------------------------|------------------------------------|
| <b>Gavião</b>       | ITS x CB                    | <b>0,7651</b>                      |
|                     | ITS x <i>Cl<sub>a</sub></i> | <b>0,7651</b>                      |
|                     | ITS x OD                    | -0,2946                            |
|                     | ITS x P <sub>T</sub>        | 0,3137                             |
|                     | ITS x N <sub>T</sub>        | <b>0,9165</b>                      |
|                     | ITS x N:P                   | -0,0499                            |
|                     | ITS x vol.(%)               | <b>-0,5838</b>                     |
| <b>Riachão</b>      | ITS x CB                    | 0,0075                             |
|                     | ITS x <i>Cl<sub>a</sub></i> | <b>0,883</b>                       |
|                     | ITS x OD                    | <b>0,644</b>                       |
|                     | ITS x P <sub>T</sub>        | 0,0755                             |
|                     | ITS x N <sub>T</sub>        | <b>0,9163</b>                      |
|                     | ITS x N:P                   | 0,039                              |
|                     | ITS x vol.(%)               | -0,283                             |
| <b>Pacofi</b>       | ITS x CB                    | <b>0,7579</b>                      |
|                     | ITS x <i>Cl<sub>a</sub></i> | <b>0,9626</b>                      |
|                     | ITS x OD                    | -0,1097                            |
|                     | ITS x P <sub>T</sub>        | <b>0,8883</b>                      |
|                     | ITS x N <sub>T</sub>        | <b>0,9415</b>                      |
|                     | ITS x N:P                   | -0,0321                            |
|                     | ITS x vol.(%)               | -0,3388                            |
| <b>Pentecoste</b>   | ITS x CB                    | 0,548                              |
|                     | ITS x <i>Cl<sub>a</sub></i> | 0,411                              |
|                     | ITS x OD                    | <b>0,754</b>                       |
|                     | ITS x P <sub>T</sub>        | 0,272                              |
|                     | ITS x N <sub>T</sub>        | -0,492                             |
|                     | ITS x N:P                   | 0,190                              |
|                     | ITS x vol.(%)               | 0,096                              |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

O Pentecoste, diferentemente do que se observa nos demais reservatórios, apresentou baixas correlações entre o ITS obtido e as concentrações de cianobactérias e clorofila *a* ( $r = 0,548$  e  $r = 0,411$ , respectivamente). No entanto, apresentou boa correlação com os níveis de oxigênio dissolvido no meio ( $r = 0,754$ ).

## 5 CONCLUSÃO

O Índice de Trofia adaptado ao trópico Semiárido – ITS demonstrou-se adequado na quantificação no nível de eutrofização dos reservatórios do semiárido cearense, compatível com os níveis de eutrofização local, apresentando uma metodologia simples e objetiva. Através da análise comparativa com o estudo de Lima (2019), o ITS proposto apresentou-se com maior sensibilidade às variações nos parâmetros de análise e, com isso, classificou o reservatório Gavião com maiores níveis de categorias tróficas. E, com isso, pode-se concluir que o ITS proposto apresentou melhorias na quantificação trófica dos reservatórios do semiárido cearenses.

Com relação à CONAMA 357/2005, observou-se que os valores das variáveis de análise apresentaram-se, em sua maioria, acima dos padrões da resolução, principalmente a contagem de cianobactérias e clorofila *a*, indicando elevado estado de deterioração desses corpos d'água, evidenciando que a classificação trófica obtida com o ITS, apresenta-se adequada, visto que, os reservatórios foram classificados em sua maioria, como eutróficos/hipereutróficos.

Vale ressaltar que a anomalia climática em decorrência do fenômeno *El niño* que perdurou durante o período em estudo, pode ter acarretado em uma piora considerável nos reservatórios em decorrência de escassas precipitações pluviométricas, implicando redução dos volumes disponíveis nos reservatórios. Apesar da correlação linear ter demonstrado baixa correlação entre o ITS obtido e o percentual de volume disponível, verificou-se elevado estágio de eutrofização, principalmente nos reservatórios com baixos volumes.

Observou-se diferenças no ITS em função das mudanças ambientais presentes nas bacias em estudo, especificamente, para o reservatório Pentecoste, que se encontra na bacia do Curu, onde os efeitos da seca são mais severos. Os demais reservatórios se encontram na bacia metropolitana, que possui menores temperaturas e maiores precipitações pluviométricas.

As variáveis contagem de cianobactérias, clorofila *a*, fósforo total e nitrogênio total apresentaram ótima correlação com o ITS calculado. Entretanto, o percentual de volume disponível obteve boa correlação com o ITS somente para o Reservatório Gavião ( $r = -0,58$ ).

Apesar da colimitação observada nos reservatórios, o fósforo, apresentou-se como principal nutriente limitante da produtividade primária, evidenciando que medidas de controle da concentração de fósforo e de nitrogênio nesses ambientes, são alternativas eficientes para o controle da eutrofização.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- a) Aplicar o ITS proposto neste estudo em outros reservatórios do semiárido;
- b) Fazer um estudo comparativo mais aprofundado entre o ITS proposto e o  $IET_{MSA}$  desenvolvido por Lima (2019);
- c) Realizar a rotação do eixo PCA e verificar se houve melhor ajuste das componentes principais na obtenção dos pesos das variáveis;
- d) Correlacionar os valores de ITS com parâmetros de salinidade.

## REFERÊNCIAS

ANA (Agência Nacional de Águas). Portal da qualidade das águas: **Indicadores de qualidade – Índice de Estado Trófico**. Disponível em: <http://portalpnqa.ana.gov.br/indicadores-estadotrofico.aspx>. Acesso em: 12 de set. 2020.

ANA (Agência Nacional de Águas). Atlas Brasil: **Abastecimento Urbano de Água**. Disponível em: <http://atlas.ana.gov.br/Atlas/forms/analise/RegiaoMetropolitana.aspx?rme=9>. Acesso em: 30 de mar. 2021.

AZEVEDO, S. M. F. O. **Toxinas de cianobactérias**: Causas e consequências para a saúde pública. Medicina on line, 1998.

BATISTA, A. C. O. N. **Alterações Hidroquímicas em Reservatórios do Semiárido Cearense**. Tese (doutorado) apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFC, 120f, Fortaleza, 2019.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA nº 357**, de 17 de março de 2005. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>. Acesso em: 10 agos. 2020.

BRASIL, J.; ATTAYDE, J. L.; VASCONCELOS, F. R.; DANTAS, D. F.; HUSZAR, V. L. M. Drought-induced water-level reduction favors cyanobacteria blooms in tropical shallow lakes. **Hydrobiologia**, v. 770, n. 1, p. 145–164, 2016.

BARBOSA, F. L. A. **A eutrofização dos recursos hídricos no Estado do Ceará**. 49 p. 2017. Monografia (Graduação) Departamento de Economia Agrícola da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza/CE, 2017.

BARROS, L. R. **O índice do estado trófico e sua adaptação para os sistemas lênticos do semiárido cearense**. 85 p, 2013. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Ceará, Programa de Gestão de Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Fortaleza/CE, 2013.

BRAGA, E. A. S. **Determinação dos compostos inorgânicos nitrogenados (amônia, nitrito e nitrato) e fósforo total, na água do açude Gavião, e sua contribuição para a eutrofização**. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Saneamento Ambiental) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

BITTENCOURT-OLIVEIRA, MC; Dias, SN; Moura, NA; Cordeiro-Araújo, MK; Dantas, EW. Seasonal dynamics of cyanobacteria in a eutrophic reservoir (Arcoverde) in a semi-arid region of Brazil. **Braz. J. Biol.**, São Carlos, vol. 72, no. 3, p. 533-544, Aug. 2012.

BIANCHI, G. B.; SVIERZOSKI, N. D. S.; ANDRADE, N. L. R. Comportamento espaço-temporal de variáveis limnológicas em área de proteção ambiental no ecossistema Amazônico. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.10, n.5, p.140-153, 2019.

BOUVY, M.; MOLICA, R.; MARINHO, M.; BEKER, B.; Dynamics of a toxic cyanobacterial bloom (*Cylindrospermopsis raciborskii*) in a shallow reservoir in the semi-arid region of northeast Brazil. **Aquatic Microbial Ecology**, vol.20, p. 285-297, 1999.

BORTOLI, S.; PINTO, E. **Cianotoxinas: características gerais, histórico, legislação e métodos de análises**. Ecologia de reservatórios e interfaces, p. 321-339, 2015.

CARLSON, R. E. **A trophic state index for lakes**. **Limnology and Oceanography**. v. 22, n. 2, p. 361-369, 1977.

Cirilo, J.A. 2008. **Políticas públicas de recursos hídricos para o semiárido brasileiro**. Universidade de São Paulo, São Paulo. Vol. 63: 61-82.

COGERH, Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Inventário Ambiental: Açude Pacoti**. 103 p. Monitoramento quantitativo e qualitativo dos recursos hídricos. Volume Único. Fortaleza, CE. Dezembro de 2011.

COGERH, Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Inventário Ambiental: Açude Riachão**. 115 p. Monitoramento quantitativo e qualitativo dos recursos hídricos. Volume Único. Fortaleza, CE. Dezembro de 2011.

COGERH, Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Inventário Ambiental: Açude Castanhão**. 142 p. Monitoramento quantitativo e qualitativo dos recursos hídricos. Volume Único. Fortaleza, CE. Dezembro de 2011.

COGERH, Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Qualidade das Águas dos Açudes Monitorados**. Campanha de fev/2020, relatório final. Fortaleza, CE. Julho de 2020. Disponível em: <https://portal.cogerh.com.br/avaliacao-mensal-da-situacao-dos-acudes-2020/>. Acesso em: 22 de agos. 2020.

COSTA, I. A. S. **Dinâmica de populações de cianobactérias em um reservatório eutrofizado do semiárido nordestino brasileiro**. 232 p. 2003. Tese (doutorado) – Universidade Federal São de Carlos. São Carlos, SP. 2003.

DUARTE, M. A. C.; CEBALLOS, B. S. O.; KONIG, A.; Melo, SOUZA H. N.; HOLANDA, A. J. A. **O índice do estado trófico de carlson (IET) aplicado em corpos aquáticos lênticos do Nordeste do Brasil**. Asociación Peruana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental – AIPS. p. 1-5, 1998.

ESTEVEES, F. A. **Fundamentos de Limnologia**. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.

FIGUEIREDO, M. C. B.; TEIXEIRA, A. S.; ARAÚJO, L. F. P.; ROSA, M. F.; HOLI, W. D.; MOTA, S.; ARAÚJO, J.C. Avaliação da vulnerabilidade ambiental de reservatórios à eutrofização. **Eng. Sanit. Ambient.**, v.12, n.4, p.399-409, Rio de Janeiro, dez. 2007.

FUNCEME - Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **Projeto Estudo da Qualidade das Águas em Reservatórios Superficiais da Bacia Metropolitana**. Relatório Final Volume 1, pg (45-100), 2002.

FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. Portal Hidrológico do Ceará: **Calendário das Chuvas no Estado do Ceará**. 2014. Disponível em: <http://www.hidro.ce.gov.br/hidro-ce-zend/app/pagina/show/160>. Acesso em: 30 de mar. 2021.

FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **Relatório Técnico: Mapeamento dos Espelhos d’água do Brasil**. 108 p. Abril, 2008.

FRANÇA, J. M. B.; WACHHOLZ, F.; NETO, J. A. C.; PAULINO, W. D. Comportamento das variáveis qualitativas do Açude Pereira de Miranda – Pentecoste/CE, no período de estiagem. São Paulo, UNESP, **Geociências**, v. 32, n. 4, p.586-599 , 2013.

GOTELLI, Nicholas. J.; ELLISON, Aaron. M. **Princípios de Estatística em Ecologia**. Rio Grande do Sul: Artmed, 2011.

GONDIM, J.; FIOREZE, A. P.; ALVES, R. F. F.; SOUZA, W G. **A seca atual no Semiárido nordestino – Impactos sobre os recursos hídricos**. Parc. Estrat., v. 22, n. 44 • p. 277-300, Brasília-DF, 2017.

HUTCHINSON, G.E. **A Treatise on Limnology: Limnological Botany**. v.3, John Wiley & Sons. 660pg, New York, 1975.

HONGYU, K.; SANDANIELO, V. L. M.; JUNIOR, G. J. O. Análise de Componentes Principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. **E&S - Engineering and Science**, p. 1-5, 2015.

JOCHIMSEN, E. M.; CARMICHAEL, W. W.; AN, J.; CARDO, D. M.; *et al.* Liver failure and death after exposure to microcystins at a hemodialyses center in Brazil. **New England Journal of Medicine**, 1998.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água**. 3 ed. Campinas, São Paulo: Editora Átomo, 2010.

LOPES, I. K. C.; CAPELO NETO, J.; ABREU, A. Z. **Determinação de toxicidade de cianobactérias da comunidade fitoplanctônica do Açude Sítios Novos, Caucaia - CE**. In:

XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos - Água, Desenvolvimento Econômico e Socioambiental, Bento Gonçalves/RS, 2013.

LAMPARELLI, M. C. **Grau de trofia em corpos d'água do Estado de São Paulo: Avaliação dos métodos de monitoramento.** 265 p. Tese (Doutorado) – Instituto de Biociências de São Paulo. Departamento de Ecologia. São Paulo, 2014.

LIMA, G. R. R. **Indicadores de Qualidade de Água dos Reservatórios Acarape do Meio e Gavião.** 78 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Saneamento Ambiental. Fortaleza, CE. 2019.

MOURA, D. S. **Eficiência de remoção de cianobactérias em filtração direta descendente.** 2016. 63 p. Monografia (Graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Fortaleza, 2016.

OLIVEIRA, M. F. **Metodologia Científica:** um manual para a realização de pesquisas em administração. 73 p. Catalão-GO, 2011.

PAESE, C.; CATEN C.; RIBEIRO, J. L. D. Aplicação da Análise de Variância na Implantação do CEP. **Revista Produção**, v. 11 n. 1, nov, 2001.

PIVELLI, R. P. **Curso Qualidade das Águas e Poluição: Aspectos Físico-Químicos.** Notas de Aula, EEUSP, 2011.

PROVETE, D. B.; SILVA, F. R.; SOUZA, T. G. **Estatística aplicada à ecologia usando o R.** Universidade Estadual Paulista, programa de Pós-Graduação Biologia Animal, São José do Rio Preto, SP, abril, 2011.

ROCHA JUNIOR, C. A. N.; COSTA, M. R. A.; MENEZES, R. F.; ATTAYDE, J. L.; BECKER, V. Water volume reduction increases eutrophication risk in tropical semi-arid reservoirs. **Acta Limnol. Bras.**, Rio Claro, v.30, e 106, abril, 2018.

ROLIM, H. O. **Proposta de índice de estado trófico em reservatórios do semiárido a partir de dados da bacia do Banabuiú, Estado do Ceará.** 2016. 129f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil na Área de Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

STREIT, N. M.; CANTERLE, L. P.; CANTO, M. W.; HYCHECKI HECKTHEUER, L. H. **As Clorofilas.** Cienc. Rural, vol.35, nº3. Santa Maria, May/June de 2005.

SANTOS, E.; MATOS, E.; ALVARENGA, J.; SALES, M.C.L. A seca no nordeste no ano de 2012: relato sobre a estiagem na e o exemplo de prática de convivência com o semiárido no distrito de Iguaçú/Canindé-CE. **REVISTA GEONORTE**, Edição Especial 2, V.1, N.5, p.819 – 830, 2012.

TYAGI, S. et al. Water Quality Assessment in Terms of Water Quality Index. **American Journal of Water Resources**, v. 1, n. 3, p. 34-38, 2013.

TOLEDO JR., A.P.; TALARICO, M. & CHINEZ, S.J.; AGUDO, E.G. A aplicação de modelos simplificados para a avaliação de processo da eutrofização em lagos e reservatórios tropicais. **In Anais Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Camboriú, Nov. 1983, 12, pg.1-34. 1983.

VIDAL, T. F.; CAPELO NETO, J. Dinâmica de nitrogênio e fósforo em reservatório na região semiárida utilizando balanço de massa. **Rev. bras. eng. agríc. Ambiental**. Campina Grande, v.18, n.4, p.402-407, abril, 2014.

VON SPERLING, M. **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos - Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias**; v. 1, 2. ed. Belo Horizonte: DESA-UFMG, 243p. 1996.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Editora UFMG, 2014.

WIEGAND, M. C; NASCIMENTO, A. T. P.; COSTA, A.C.; NETO, I. E. L. Avaliação do Nutriente Limitante da Produção Algal em Reservatórios do Semiárido Brasileiro. **RBCIAMB**, v. 55, n.4, p. 456-478, dez, 2020.

XU, H.; PAERL, H. W.; QIN, B.; ZHU, G.; GAO, G. Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China. **Limnology and Oceanography**, v.55, p.420-443, 2010.